

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI  
BOLOGNA

---

---

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA  
CAMPUS DI CESENA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA, INFORMATICA E  
TELECOMUNICAZIONI

**Studio e analisi di circuiti di energy  
harvesting a switch sincronizzato  
per trasduttori piezoelettrici**

—

ELABORATO IN  
ELETTRONICA DEI SISTEMI DIGITALI

RELATORE:  
**Prof. Aldo Romani**

PRESENTATA DA:  
**Alice Marzioli**

CORRELATORE:  
**Dott. Matteo Filippi**

II SESSIONE  
ANNO ACCADEMICO 2014/2015



*Al mio Alessandro...*



# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>1 Il Modello Elettromeccanico</b>	<b>3</b>
1.1 Il circuito equivalente . . . . .	4
1.2 Conversione sincrona ed effetto damping . . . . .	6
<b>2 Caratteristiche statiche</b>	<b>11</b>
2.1 Caratterizzazione dei modelli . . . . .	12
2.1.1 Modello con rettificatore . . . . .	12
2.1.2 Modello SECE con rettificatore . . . . .	15
2.1.3 Modello SSHI-parallel con rettificatore . . . . .	17
2.2 Confronto dei grafici . . . . .	19
<b>3 SECE e Q-SECE con fattori aleatori</b>	<b>21</b>
3.1 Simulazioni LTspice . . . . .	21
3.1.1 Modello Circuitale e Netlist . . . . .	22
3.1.2 Descrizione del modello e interazione con Matlab . . . . .	24
3.2 Algoritmi Matlab . . . . .	26
3.2.1 Generazione degli impulsi . . . . .	26
3.2.2 Scrittura su file degli impulsi PWL . . . . .	32
3.2.3 Calcolo dell'energia . . . . .	35
3.3 Valutazioni e Confronto dei metodi . . . . .	36
3.3.1 Analisi delle forme d'onda . . . . .	37
3.3.2 Stima Energetica . . . . .	39
<b>4 SSHI-parallel</b>	<b>45</b>
4.1 Approccio al modello . . . . .	45
4.1.1 Configurazioni SSHI . . . . .	46
4.1.2 Effetti del ritardo . . . . .	47
4.2 Simulazione LTspice . . . . .	49
4.3 Energia Estratta . . . . .	53

4.3.1	L'algoritmo Matlab . . . . .	53
4.3.2	Stima dell'energia . . . . .	54
	<b>Conclusioni</b>	<b>57</b>
	<b>Elenco delle Figure</b>	<b>58</b>
	<b>Elenco delle Tabelle</b>	<b>59</b>
	<b>Listings</b>	<b>61</b>
	<b>Ringraziamenti</b>	<b>65</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>67</b>

# Introduzione

L'**energy harvesting** è il processo attraverso cui una parte dell'energia proveniente dall'ambiente che ci circonda, disponibile sotto forma di energia termica, solare, meccanica, eolica, viene prelevata, immagazzinata e successivamente convertita in energia elettrica direttamente utilizzabile. Tuttavia, le quantità di energia estratta da tali fonti non sono sufficienti per eseguire un qualsiasi lavoro utile e fornire un'adeguata potenza per qualsiasi scopo. Questo scenario è destinato a cambiare poiché lo sviluppo di nuove tecniche di estrazione da fonti alternative ha favorito e aumentato l'efficienza energetica dei nuovi dispositivi che catturano e trasformano tracce di energia dall'ambiente con bassi costi di consumo. Gli studi condotti fino ad oggi sui circuiti di energy harvesting e sui trasduttori piezoelettrici hanno come obiettivo quello di fornire una valida alternativa alle batterie che devono alimentare reti di sensori e dispositivi elettronici portatili utilizzati in numerosi ambiti, come per esempio il campo medico o quello urbano, abbattendo in questo modo i costi necessari alla loro alimentazione.

In quest'elaborato verranno analizzati principalmente due metodi, già ampiamente studiati nella letteratura scientifica, per poter convertire le vibrazioni meccaniche in uscita da un trasduttore piezoelettrico in energia elettrica e raccogliere (come indica lo stesso termine *harvesting*) tutta la carica nel condensatore di *storage*. L'obiettivo principale su cui ci si è focalizzati maggiormente è stato quello di simulare il loro comportamento in **risonanza** tramite l'utilizzo del software LTspice e trovare il metodo più efficiente in termini di prestazioni energetiche con cui estrarre energia, mediante l'utilizzo di *script* Matlab. In particolare è stato analizzato e simulato il comportamento dei modelli circuitali **SECE** (*Synchronous Electric Charge Extraction*) e **SSHI-parallel** (*Synchronized Switch Harvesting on Inductor*), comandando la conversione tramite uno **switch**, prima sincrono poi asincrono determinato da fattori aleatori, infine calcolata e confrontata l'energia estratta da tali conversioni.

Dopo un primo sguardo al modello elettromeccanico e all'**effetto damping**, dovuto al forte accoppiamento della parte meccanica alla parte elettrica

che si fa sentire quanto più si lavora vicino la frequenza di risonanza, saranno analizzate le caratteristiche Potenza-Tensione in uscita ( $P - V_{out}$ ) dei circuiti sopracitati, ricavate dalle simulazioni eseguite con il software LTspice. Successivamente si passerà all'analisi e al confronto della conversione SECE e Q-SECE (*Quasi-Synchronous Electric Charge Extraction*), revisionando studi precedentemente compiuti e discutendo i dati ottenuti. Stessa analisi è stata fatta anche per il modello SSHI-parallel, focalizzando l'attenzione sugli effetti del ritardo, positivo e negativo, introdotto proprio dallo *switch* tra l'istante in cui viene individuato un picco massimo o minimo della tensione in uscita dal trasduttore piezoelettrico e l'istante in cui avviene l'inversione di tale tensione.



# Capitolo 1

## Il Modello Elettromeccanico

In questo capitolo verrà descritto il circuito equivalente elettromeccanico del trasduttore piezoelettrico, completamente analizzato e studiato in [1]. La Figura 1.1 rappresenta la tipica struttura con cui viene rappresentato un trasduttore piezoelettrico soggetto a vibrazioni.

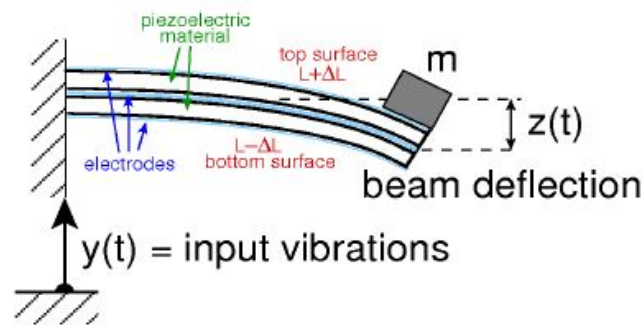


Figura 1.1: Rappresentazione del trasduttore piezoelettrico [2].

Nella letteratura scientifica, sono stati proposti molti modelli per rappresentare in maniera analitica il trasduttore piezoelettrico ma la rappresentazione più diffusa si basa sul modello elettromeccanico a parametri concentrati, costituito sia da elementi meccanici che elettrici. Infatti, con questa rappresentazione si può notare che uno stimolo applicato nella parte elettrica, per esempio tramite un circuito di controllo per la conversione, produce degli effetti nella parte meccanica [2]; ciò non sarebbe stato possibile se fosse stata utilizzata una rappresentazione del modello puramente capacitiva, valida per trasduttori debolmente accoppiati o che lavorano fuori risonanza. È bene tenere presente che, nel caso reale, le vibrazioni meccaniche, rappresentate con una sinusoide, non sono sempre continue e regolari ed è per questo mo-

tivo che non risulta facile fornire una tensione d'uscita stabile al carico. In molte implementazioni è stato aggiunto un rettificatore passivo per garantire un'uscita in continua al carico, anche se la condizione di massimo trasferimento di energia si ottiene sotto specifiche condizioni, che riguardano non solo il tipo di carico usato, ma anche la frequenza di lavoro del circuito. La *performance* generale dipende anche da altri fattori, come il tipo di massa inerziale posta tra il trasduttore e l'interfaccia elettronica, la geometria e il materiale usato per costruire il trasduttore: per le simulazioni eseguite in quest'elaborato si farà riferimento ad una massa inerziale di 7g e verranno utilizzati i dati ricavati in [1] per la frequenza di risonanza a vuoto e per i valori dei parametri relativi all'oscillazione del piezoelettrico, come la costante di smorzamento per libere oscillazioni, l'accelerazione della massa inerziale, l'elongazione picco picco, con le quali è stato possibile ricavare le grandezze del modello elettromeccanico mostrate in seguito nella Netlist. Tuttavia nel modello che verrà analizzato, ci si troverà di fronte a due problematiche: il forte accoppiamento tra la maglia meccanica e la maglia elettrica, e il processo di conversione che è solitamente non lineare e coinvolge un circuito di controllo.

## 1.1 Il circuito equivalente

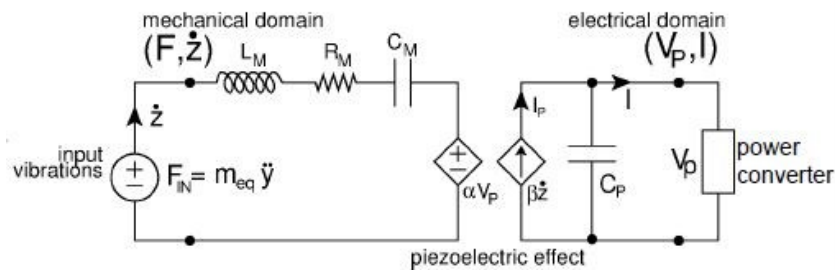
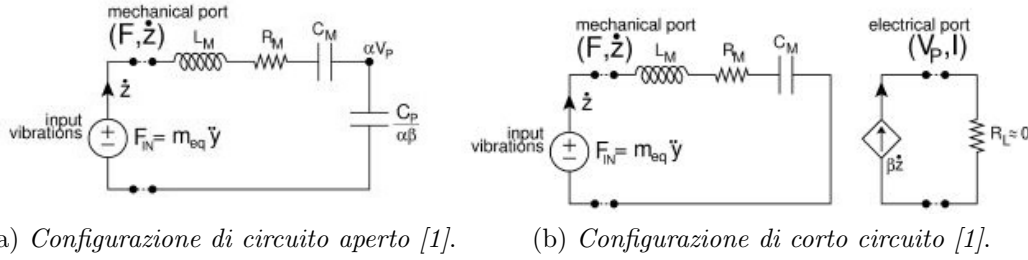


Figura 1.2: Circuito equivalente elettromeccanico del trasduttore piezoelettrico [2].

Osservando la Figura 1.2 relativa al modello generale del circuito equivalente elettromeccanico, si nota che le correnti che circolano nella maglia meccanica sono associate alla velocità di oscillazione della massa inerziale  $\dot{z}$ , mentre il generatore di tensione che alimenta la parte meccanica è associato ad una forza  $F_{in} = m\ddot{y}$ . Le tre grandezze che seguono  $L_m, R_m, C_m$  rappresentano rispettivamente la massa inerziale, le perdite meccaniche e l'elasticità meccanica del trasduttore; ad opporsi alla  $F_{in}$  vi è un generatore controllato



(a) Configurazione di circuito aperto [1].

(b) Configurazione di corto circuito [1].

Figura 1.3: Circuito equivalente nelle due configurazioni di circuito aperto e corto circuito.

in tensione  $\alpha V_p$ , il quale dipende proprio dalla tensione che si trova ai capi del condensatore  $C_p$  grazie ad un meccanismo di retroazione, producendo l'effetto piezoelettrico inverso. Questo generatore interagisce con il generatore controllato in corrente  $\beta \dot{z}$ , posto nella maglia elettrica, ed entrambi sono i responsabili dell'accoppiamento elettromeccanico, non trascurabile per quei trasduttori che lavorano vicino la loro frequenza di risonanza. È proprio questo il motivo per cui è di fondamentale importanza tener presente questo fenomeno durante il processo di conversione, poiché è il responsabile della risposta meccanica e della performance di potenza [3].

Analizzando la parte elettrica, è possibile vedere che la velocità meccanica  $\dot{z}$  produce la corrente  $\beta \dot{z}$  che alimenta la capacità d'uscita del piezoelettrico e qualsiasi carico connesso, realizzando l'effetto piezoelettrico diretto. Come si può notare dalla Figura 1.3 in configurazione di circuito aperto e in configurazione di corto circuito, studiando le grandezze  $F_{in}$  e  $\dot{z}$  e ragionando in termini di circuiti oscillanti, è possibile ricavare i valori delle quantità necessarie per analizzare il circuito.

Nella configurazione di circuito aperto, la frequenza alla quale si osserva un picco di tensione in regime di oscillazioni armoniche forzate è:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_m C_{eq}} - \frac{2}{\tau^2}} \cong \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_m C_{eq}}} \quad (1.1)$$

detta anche frequenza elettrica. Questa formula sarà quella utilizzata nel Capitolo 3 per verificare la frequenza di risonanza del circuito simulato con l'analisi .ac. La capacità  $C_{eq}$  è il risultato della serie:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_m} + \frac{\alpha\beta}{C_p} \quad (1.2)$$

Quando il trasduttore si trova nella configurazione di corto circuito, questo si comporta come un oscillatore meccanico e la frequenza alla quale si

osserva la massima ampiezza della velocità  $\dot{z}$  è detta frequenza meccanica, espressa dalla formula:

$$f_M = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{L_m C_m}} \quad (1.3)$$

La costante di tempo che esprime il decadimento esponenziale per libere oscillazioni, valida per entrambe le configurazioni, è data da:

$$\tau = \frac{2L_m}{R_m} \quad (1.4)$$

Per massimizzare la potenza estraibile da questa configurazione alla frequenza  $f_m$ , è necessario trovare un'impedenza  $Z(f)$  in grado di eliminare gli effetti reattivi di  $\frac{C_p}{\alpha\beta}$  e di caricare l'oscillatore meccanico grazie a  $R_m$ . Come descritto in [1], la potenza massima disponibile e trasferibile con carico lineare diventa:

$$P_H = \frac{\beta F_{IN}^2}{8\alpha R_m} = \frac{\beta}{8\alpha} R_m (\pi f_M \Delta z)^2 \quad (1.5)$$

dove  $\Delta z$  è l'elongazione picco picco. Lo scopo di questo studio è di trovare un modo efficiente per poter trasferire al carico tale potenza estratta; tuttavia, essendo SECE e SSHI convertitori non lineari, le potenze ricavate con queste tecniche di estrazione non possono essere confrontate con il caso lineare. Infatti, come si vedrà in seguito, la potenza massima aumenterà con conversioni non lineari.

## 1.2 Conversione sincrona ed effetto damping

In questa sezione, si farà riferimento agli studi e ai risultati sperimentali in [1] e [2].

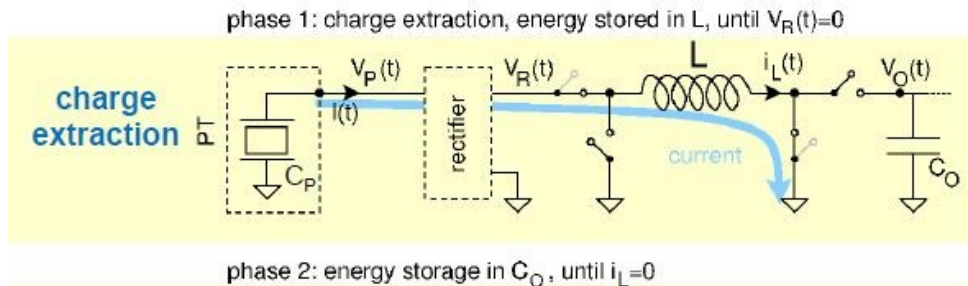


Figura 1.4: Processo di immagazzinamento della carica [2]

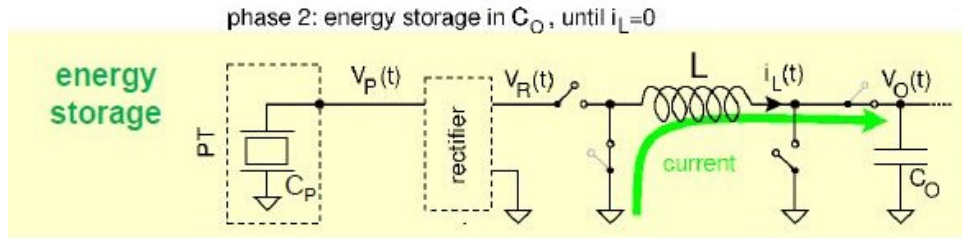


Figura 1.5: Processo di estrazione dell'energia [2]

Le Figure 1.4 e 1.5 descrivono il meccanismo della prima soluzione proposta per immagazzinare la potenza disponibile fornita dal trasduttore piezoelettrico, chiamata *Synchronous Electrical Charge Extraction* (SECE). Quest'implementazione è costituita da quattro *switches*, comandati da un circuito di controllo, da un induttore  $L$  e da un condensatore  $C_o$  detto capacità di *storage*. La tensione  $V_p$ , generata dalle vibrazioni, viene monitorata nel tempo grazie alla sua bassa frequenza e, quando si verifica un massimo o un minimo locale di tensione, si vengono a creare due circuiti risonanti grazie ai quali è possibile estrarre la carica elettrica dal circuito:  $L - C_p$  e  $L - C_o$ . Seguendo il cammino in Figura 1.4, il condensatore  $C_p$  viene immediatamente scaricato da  $L$ , ma non appena la  $V_p$  raggiunge 0V e la corrente  $i_L$  raggiunge il suo massimo valore, si passa alla seconda configurazione, come si vede in Figura 1.5, dove  $L$  viene connesso a  $C_o$  e la sua corrente viene forzata a scorrere attraverso la capacità di *storage*, aumentando la tensione in uscita. Appena  $i_L$  raggiunge lo zero anche la tensione  $V_o$  smette di salire e tutti gli *switches* tornano nella configurazione iniziale. Andando a misurare la tensione picco picco ai capi di  $V_p$ , si nota un incremento di tale tensione e nel modello capacitivo si calcola addirittura un raddoppio. È bene tenere presente, che questa implementazione, a differenza delle comuni tecniche di estrazione SECE, non presenta il ponte raddrizzatore e quindi non tiene conto della caduta di tensione dovuta alle soglie dei diodi e della relativa perdita di potenza dovuta all'induttore posto in serie.

I risultati dell'estrazione di carica sincrona sono stati prima analizzati e poi, tramite procedure sperimentali e di misure, sono stati simulati con il software LTspice, come riportato in [1]. Come spiegato anche in [2], la conversione SECE produce l'effetto di smorzamento che avviene intorno alla frequenza di risonanza e ciò porta ad un peggioramento delle prestazioni. La conversione SECE applica una serie di impulsi periodici di corrente, i quali producono una risposta forzata  $\alpha V_p$  che si oppone alla forza  $F_{in}$  del generatore meccanico, ma, disegnando il loro spettro di frequenza, si vede che solo la prima armonica produce una risposta di *feedback* alla parte meccanica. Ed

è proprio alla frequenza di risonanza che questa risposta si fa sentire maggiormente, producendo quello che si chiama *effetto damping*. La conseguenza visibile di questo effetto è una notevole diminuzione della tensione d'uscita e quindi dell'energia raccolta.

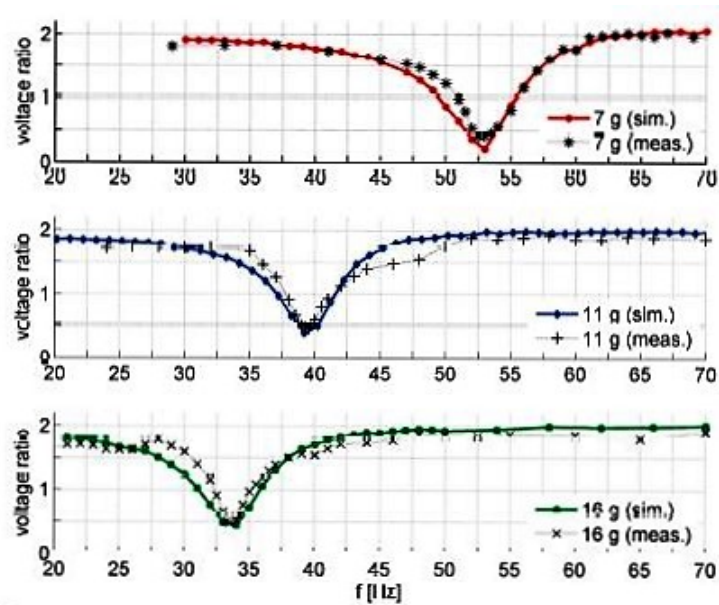


Figura 1.6: Andamento del rapporto di tensione  $k = \frac{V_p^*}{V_{p0}}$  in circuito aperto per ogni frequenza. Si nota un'attenuazione in corrispondenza della frequenza di risonanza, calcolata in questi grafici per masse inerziali differenti. Quest'immagine è stata presa da [1] nella V sezione, relativa ai risultati sperimentali.

Le misure sperimentali che verranno riportate di seguito fanno riferimento a [1]. Per prima cosa, sono stati identificati i parametri del modello elettromeccanico, utilizzando un traduttore Q220-A4-303YB e tre masse differenti poste alla sua estremità di 7g, 11g, 16g. Nella tabella sottostante, presa da [1], sono riportati i valori misurati sperimentalmente.

TABLE I  
MEASUREMENTS AND MODEL PARAMETERS FOR THE CONSIDERED  
PIEZOELECTRIC TRANSDUCERS

Parameter	Tip Mass 7 g	Tip Mass 11 g	Tip Mass 16 g
$C_P$ [nF]	48.6	49.1	49.1
$f_0$ [Hz]	53.1	40.0	33.8
$V_P(f_0)$ [ $V_{RMS}$ ]	10.26	10.98	8.51
$\Delta z(f_0)$ [mm]	0.85	0.94	0.72
$\ddot{y}(f_0)$ [ $g_{RMS}$ ]	0.100	0.070	0.041
$f_M$ [Hz]	49.2	37	31.1
$\tau$ [s]	0.15	0.20	0.24
$\beta$ [As/m]	$1.67 \cdot 10^{-3}$	$1.62 \cdot 10^{-3}$	$1.63 \cdot 10^{-3}$
$L_M$ [kg]	$1.84 \cdot 10^{-1}$	$6.84 \cdot 10^{-2}$	$1.45 \cdot 10^{-1}$
$C_M$ [m/N]	$5.68 \cdot 10^{-5}$	$2.09 \cdot 10^{-4}$	$1.80 \cdot 10^{-4}$
$R_M$ [Ns/m]	0.995	0.842	0.759
$\alpha$ [N/V]	$8.30 \cdot 10^{-2}$	$2.03 \cdot 10^{-2}$	$3.03 \cdot 10^{-2}$

Figura 1.7: Valori dei parametri del modello elettromeccanico misurati sperimentalmente con tre masse inerziali di 7g, 11g, 16g [1].

Volendo provare il grado di affidabilità di questo tipo di conversione, sono state eseguite delle simulazioni confrontate con i dati delle precedenti misure sperimentali. Dopo aver studiato il comportamento del circuito nel dominio della frequenza, sono state applicate delle sinusoidi a frequenze diverse e misurate la tensione  $V_{p0}(f)$ ,  $\Delta z(f)$  e l'accelerazione in ingresso: come mostrato nella Figura 1.6 sopra, “*attorno alla risonanza il convertitore di potenza produce un significativo ed indesiderato damping effect o effetto di smorzamento*” [3]. Per questo motivo, si è passati ad indagare un'altra tecnica di estrazione della carica dal trasduttore, utilizzando degli impulsi non più sincroni con il massimo o il minimo locale di  $V_{p0}$ , ma pseudo-casuali. Con questa tecnica, chiamata *Quasi-Synchronous Electric Charge Extraction* (Q-SECE), si vuole diffondere parte degli impulsi di corrente del caso SECE fuori dalla banda di lavoro del piezoelettrico: gli impulsi vengono *randomizzati* controllando una variabile globale che determina la probabilità  $P$  che tali impulsi si attivino per l'estrazione della carica e modificando il  $\Delta T$ , ovvero il ritardo/anticipo introdotto in ogni conversione. In questo modo ogni conversione non corrisponderà più con la massima tensione raggiunta da  $V_{p0}$  e alcune conversioni saltano perché non tutti gli impulsi vengono attivati: ciò significa che in termini di energia estratta si avrà un decremento, ma ci si aspetta una diminuzione dell'effetto *damping* e quindi una minore attenuazione della tensione in uscita. I risultati sperimentali presenti in [2] mostrano che la tecnica Q-

SECE aumenta la potenza estratta del +29% rispetto al caso SECE e che il consumo di potenza dello *switch* del circuito di controllo può essere ridotto senza deteriorare la potenza in uscita.

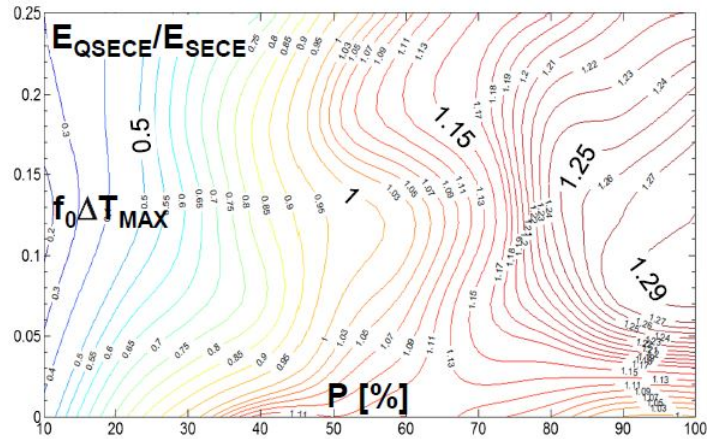


Figura 1.8: Confronto del rendimento di potenza nel caso SECE e Q-SECE. In questo grafico è rappresentata l'energia estratta da un trasduttore Q220-A4-303YB PT con massa inerziale 7g. Immagine tratta dallo studio e dai risultati sperimentali in [2]

Questa tesi si propone di indagare sperimentalmente tali risultati, partendo da studi e misure sperimentali precedentemente affrontati. Si cercherà di trovare numericamente il miglioramento effettivo tra l'energia estratta con la tecnica Q-SECE e SECE, utilizzando però non il modello "standard" del circuito, ma aggiungendo il rettificatore tra il trasduttore e il circuito di estrazione. Prima di passare alle simulazioni, verrà proposto nel prossimo capitolo l'analisi delle caratteristiche P-V dei circuiti:

- modello elettromeccanico con rettificatore;
- SECE con rettificatore;
- SSHI con rettificatore.



## Capitolo 2

# Caratteristiche statiche di trasferimento di potenza

In questo capitolo verranno analizzate le caratteristiche statiche di trasferimento di potenza dei modelli circuitali corrispondenti alle tecniche di conversione analizzate in quest'elaborato. Saranno analizzate le risposte in uscita dei vari modelli nel caso:

- Modello elettromeccanico con rettificatore;
- Modello elettromeccanico con rettificatore, tecnica di estrazione SECE;
- Modello elettromeccanico con rettificatore, tecnica di estrazione SSHI-parallel.

In ambiente LTspice, sono stati simulati questi tre casi, sostituendo al condensatore di *storage* un generatore di tensione in uscita in continua su cui calcolare la potenza media che viene fornita all'utilizzatore. Per poter graficare l'andamento della potenza rispetto alla tensione in uscita, sono state eseguite delle misure, facendo variare il valore in continua assunto dal generatore in un range che va da zero al valore della tensione d'uscita a vuoto del modello elettromeccanico. Tutte le simulazioni sono state fatte con l'analisi in transitorio `.tran 0 6s 1s 5μs` impostando  $G_{min} = 1 \times 10^{-6}$ . I vari punti ottenuti sono stati inseriti in Matlab per ottenere i rispettivi diagrammi.

## 2.1 Caratterizzazione dei modelli

### 2.1.1 Modello con rettificatore

In questa sezione verrà mostrato il risultato della caratteristica Potenza-Tensione ottenuto dal circuito equivalente elettromeccanico del trasduttore piezoelettrico con il ponte di diodi. Il risultato che ci si aspetta è un andamento non lineare dovuto alla non linearità dei diodi e del metodo di conversione.

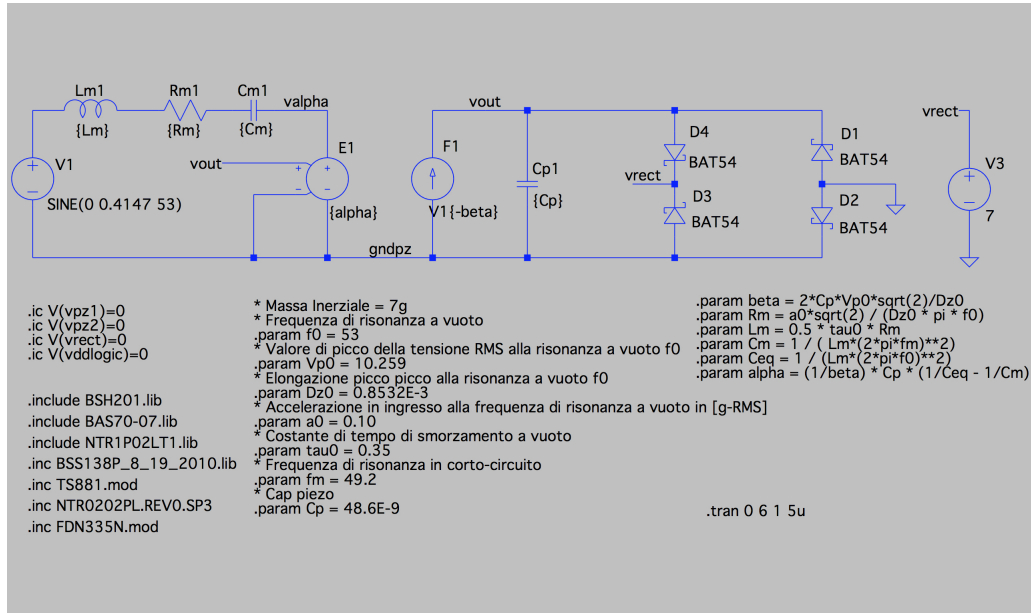


Figura 2.1: Modello elettromeccanico con rettificatore.

In Figura 2.1 è disegnato il modello elettromeccanico con il raddrizzatore a doppia onda: la forma d'onda in uscita dal ponte,  $v_{rect}$ , è quella a cui viene collegato il generatore  $V3$ . Una volta eseguita la simulazione, viene graficato il prodotto  $V(v_{rect}) \times I(V3)$ , dove  $I(V3)$  è la corrente entrante nel generatore: sarà LTspice a fornire il valore della potenza media. È stato ripetuto questo procedimento partendo da 0V fino a 16V, che è proprio il valore della tensione a vuoto di  $v_{out}$ . Viene riportata la Tabella 2.1 con i valori Potenza-Tensione misurati e il relativo grafico, ottenuto con il *plot* dei punti in Matlab.

$V(V_3)[V]$	$P(V_3)_{average}[\mu W]$
0	0
0.3	14.812
0.5	24.009
0.7	32.756
0.9	41.104
1	45.140
2	81.166
3	110.46
4	133.84
5	151.70
6	164.22
7	171.55
8	173.77
9	170.93
10	163.11
11	150.34
12	132.68
13	110.15
14	82.799
15	50.667
16	13.79
16.33	0.585

Tabella 2.1: Valori Tensione-Potenza nel caso di rettificatore.

Come si può vedere in Figura 2.2, l'andamento della potenza in uscita in funzione della tensione in uscita è di tipo parabolico. Questa forma d'onda mostra che il rettificatore ha un punto di massimo, cioè la configurazione migliore in cui avviene il massimo trasferimento di potenza, che si aggira intorno ai  $173.77 \mu W$ , viene ottenuto assegnando al generatore ( $V_3$ ) un valore in continua di 7V.

Andando a misurare la potenza in uscita, fornendo al generatore un valore maggiore di 16V, si ottengono potenze negative che non sono state inserite poiché non sono potenze assorbite dal carico ma erogate da generatore.



Figura 2.2: Andamento della potenza fornita in uscita nel caso rettificatore.

### 2.1.2 Modello SECE con rettificatore

Viene ora analizzato il modello circuitale che sarà utilizzato per le simulazioni fatte nel Capitolo 3. Questo modello rappresenta la tecnica di estrazione di carica sincrona e quasi sincrona, trattate in seguito.

In Figura 2.6 viene mostrato il modello equivalente elettromeccanico con l'aggiunta del ponte e del circuito dedicato all'estrazione. In questo modello vengono utilizzati due *switches ideali* comandati dal segnale PWL, l'induttore  $L_1$  con il quale viene immagazzinata la carica estratta, infine è stato collegato in uscita il generatore  $V_3$ , al posto del condensatore di *storage*. È stato ripetuto lo stesso procedimento descritto sopra per le misure.

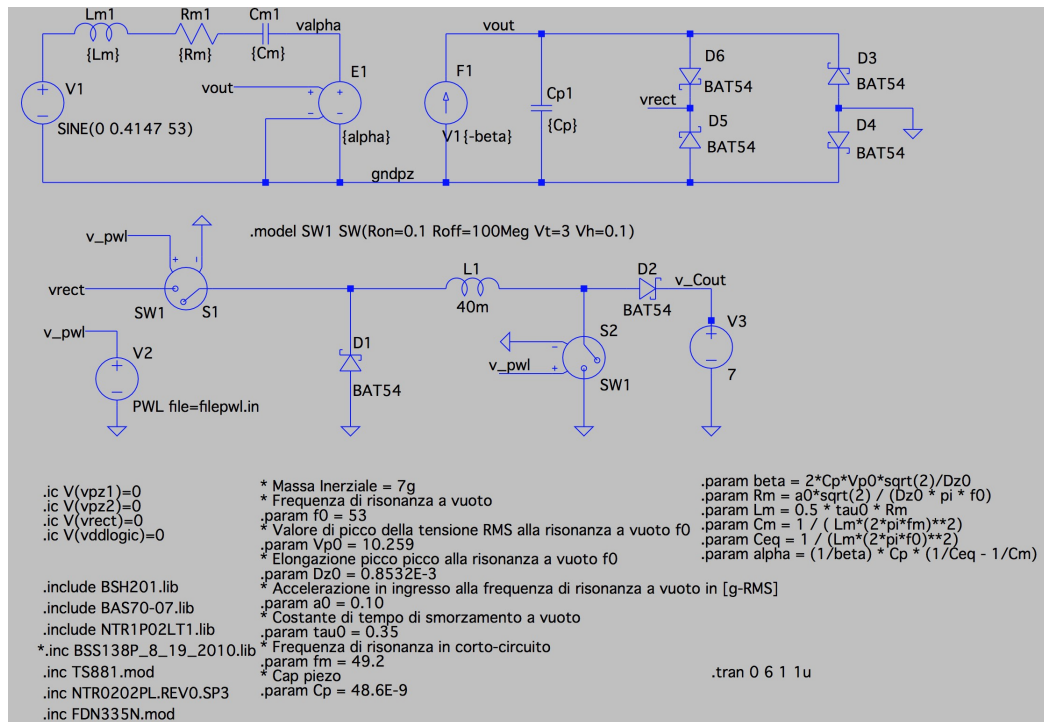


Figura 2.3: Circuito con estrazione SECE e rettificatore.

L'andamento osservato per la tecnica di estrazione SECE non è perfettamente parabolico, ma per basse tensioni di  $V_3$  la potenza fornita cresce rapidamente assestandosi intorno agli  $84.7 \mu W$ , per poi decrescere lentamente fino a valori di  $V_3$  pari a  $12.5V$ , sotto ai quali la potenza diventa addirittura negativa. Il punto di massimo guadagno del rettificatore in questo caso è stato registrato intorno ai  $3V$ .

$V(V_3)[V]$	$P(V_3)_{average} [\mu W]$
0	0
0.3	35.36
0.5	48.19
0.7	57.07
0.9	63.566
1	66.178
2	80.408
3	84.702
4	84.509
5	81.415
6	76.145
7	69.087
8	60.247
9	49.724
10	37.567
11	23.812
12	8.490
12.5	0.219

Tabella 2.2: Valori Tensione-Potenza nel caso SECE con rettificatore.

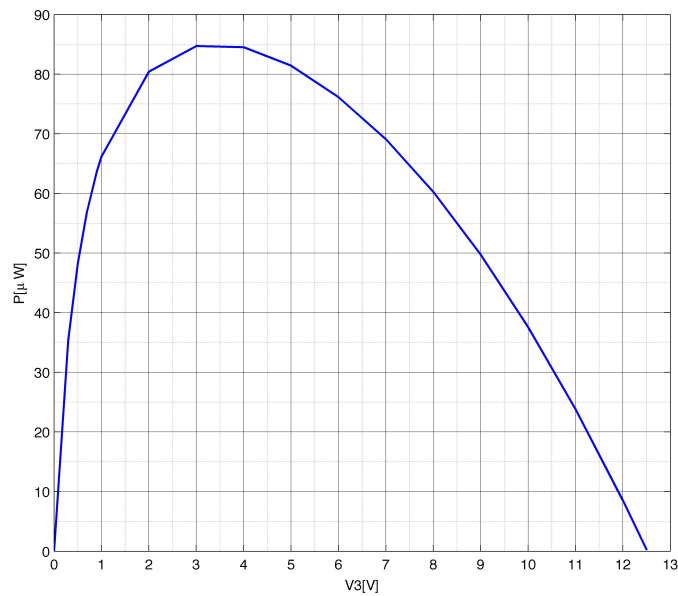


Figura 2.4: Andamento della potenza con implementazione SECE.

### 2.1.3 Modello SSHI-parallel con rettificatore

In quest'ultima sezione, viene ripetuto lo stesso procedimento eseguito per le misure dei casi precedenti, analizzando la potenza estratta nel caso di tecnica SSHI-parallel.

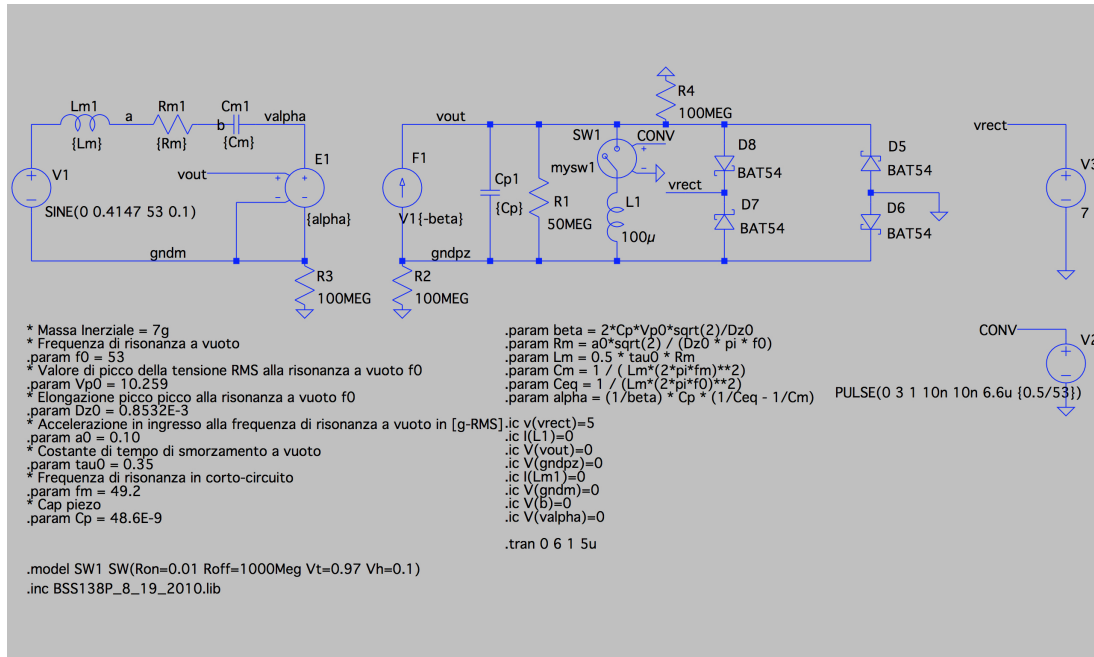


Figura 2.5: Circuito con estrazione SSHI-parallel e rettificatore.

In Figura 2.5, viene mostrato il modello elettromeccanico a cui è stato collegato in parallelo uno *switch* e un induttore per implementare questa tecnica seguito dal rettificatore e dal generatore  $V3$ : anche in questo caso, viene misurata la potenza media in uscita tramite il prodotto  $vrect \times I(V3)$ , facendo variare il valore in continua del generatore  $V3$  in un intervallo che va da 0V a 15V circa.

L'andamento ottenuto è di tipo parabolico, come nel caso di circuito con solo rettificatore. La potenza in uscita raggiunge lo stesso valore del caso rettificatore ma con una tensione più bassa.

Anche in questo caso il range di valori in cui è stata calcolata la caratteristica varia da 0V a circa 14.5V; misurando la potenza in uscita per tensioni superiori ai 15V sono stati registrati dei valori negativi che non sono stati volutamente inseriti nella tabella, dato che si vuole studiare solo la potenza trasferita e non quella ceduta dal generatore di Bias.

$V(V_3)[V]$	$P(V_3)_{average} [\mu W]$
0	0
0.3	15.245
0.5	24.994
0.7	34.413
0.9	43.502
1	47.924
2	87.665
3	119.46
4	143.61
5	160.4
6	170.1
7	172.99
8	169.38
9	159.48
10	143.36
11	121.34
12	93.608
13	60.258
14	21.434
14.5	0.029

Tabella 2.3: Valori Tensione-Potenza nel caso SSHI-parallel con rettificatore.

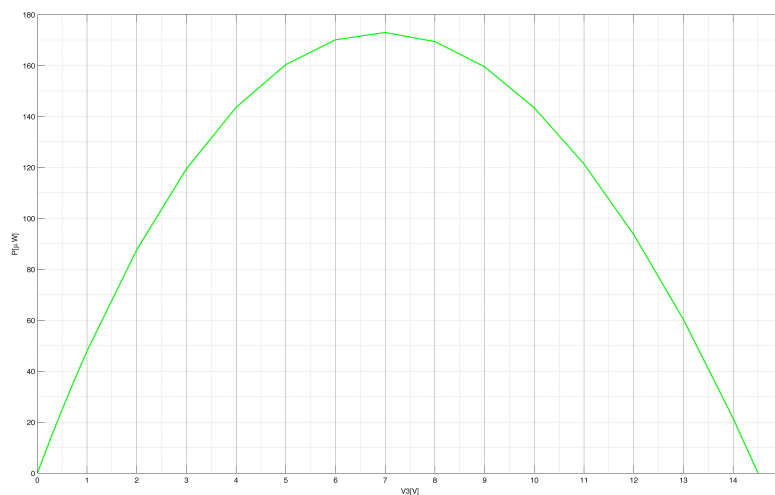


Figura 2.6: Andamento della potenza con implementazione SSHI.



## 2.2 Confronto dei grafici

Nella Figura 2.7 sono stati riportati i grafici ottenuti dalle misure eseguite in un unico diagramma:

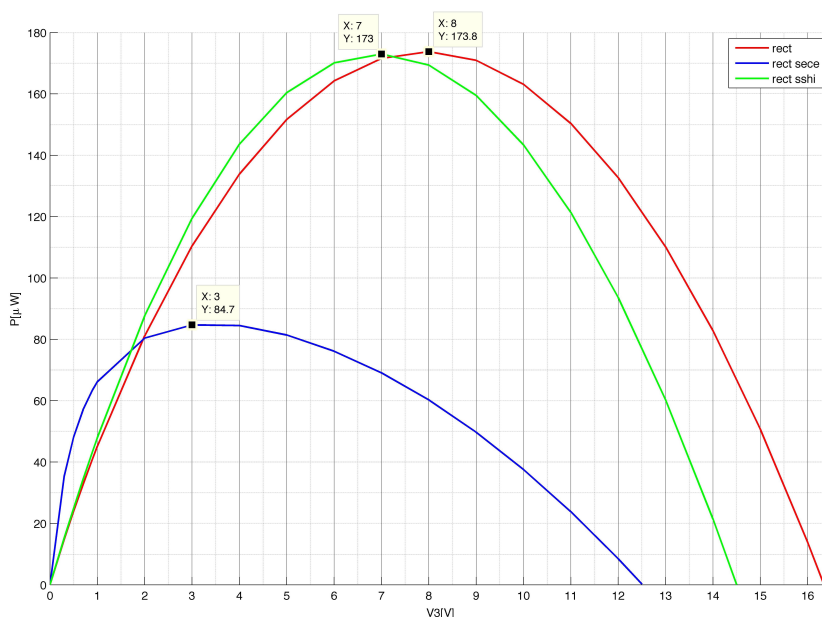


Figura 2.7: Confronto dei grafici ottenuti dalle misure effettuate.

Osservando le curve del rettificatore (rossa) e del SSHI (verde), si nota che la caratteristica presenta un andamento di tipo parabolico: entrambi riescono a fornire una potenza d'uscita massima di circa  $173 \mu\text{W}$  con la differenza che l'SSHI raggiunge per primo questo massimo, con un valore in continua di circa  $7\text{V}$ . Ciò significa che la conversione SSHI degrada di poco l'energia in uscita dal convertitore.

Osservando la curva del modello SECE (blu), si nota inizialmente un incremento ripido della potenza per basse tensioni, anche se rispetto alle altre due analizzate, la curva SECE rimane nettamente inferiore. Per valori di  $V_3$  intorno ai  $3\text{V}$ , si registra il punto di massima potenza trasferita, circa  $84.7 \mu\text{W}$ ; misurando i valori di tensione successivi, si nota che la potenza fornita si mantiene costante fino ai  $4\text{-}5\text{V}$ , dopodichè la curva inizia a decrescere lentamente, fino ai  $13\text{V}$ .

Questo risultato potrebbe significare che, nonostante le tecniche di estrazione SECE e Q-SECE risultino valide per estrarre energia, la potenza in uscita risulta degradata a causa di una minore efficienza del convertitore.



# Capitolo 3

## SECE e Q-SECE con fattori aleatori

In questo capitolo verrà simulato il circuito elettromeccanico con conversione di carica sincrona e successivamente quasi-sincrona con impulsi randomizzati. I risultati dell'energia estratta ottenuti dalle simulazioni delle due conversioni, al variare di alcuni parametri e condizioni, saranno messi a confronto a fine capitolo e sarà possibile determinare quale dei due metodi è il più efficiente per estrarre energia.

È stato ampiamente discusso in [1] che la conversione con impulsi sincroni produce un indesiderato effetto di smorzamento della tensione in uscita dovuto al forte accoppiamento delle due parti del modello, che si presenta quando il circuito lavora alla frequenza di risonanza. È per questo motivo che viene di seguito proposta la soluzione Q-SECE, ovvero una conversione con impulsi randomizzati, in cui l'effetto *damping* provoca un'attenuazione minore rispetto al caso sincrono, pur lavorando sempre in risonanza. L'aleatorietà di questi impulsi generati con una sequenza pseudo-casuale sta nel fatto che, controllando due variabili, è possibile determinare con quanto ritardo o anticipo si può convertire rispetto al picco e la probabilità che questi impulsi si verifichino.

### 3.1 Simulazioni LTspice

Utilizzando il simulatore LTspice, è stato disegnato il circuito equivalente elettromeccanico, inserendo i valori presenti nella tabella in [1]:

- **Massa Inerziale:**  $m = 7g$
- **Capacità piezo:**  $C_p = 48.6nF$

- Frequenza di Risonanza Elettrica:  $f_o = 53Hz$
- Valore di picco della tensione alla frequenza di risonanza:  
 $V_p(f_o) = 10.265V$
- Elongazione picco picco alla frequenza di risonanza:  
 $\Delta z(f_o) = 0.85mm$
- Accelerazione in ingresso alla frequenza di risonanza:  
 $\ddot{y}(f_o) = 0.1g_{RMS}$
- Frequenza di Risonanza Meccanica:  $f_m = 49.2Hz$
- Costante di decadimento esponenziale:  $\tau = 0.35s$

### 3.1.1 Modello Circuitale e Netlist

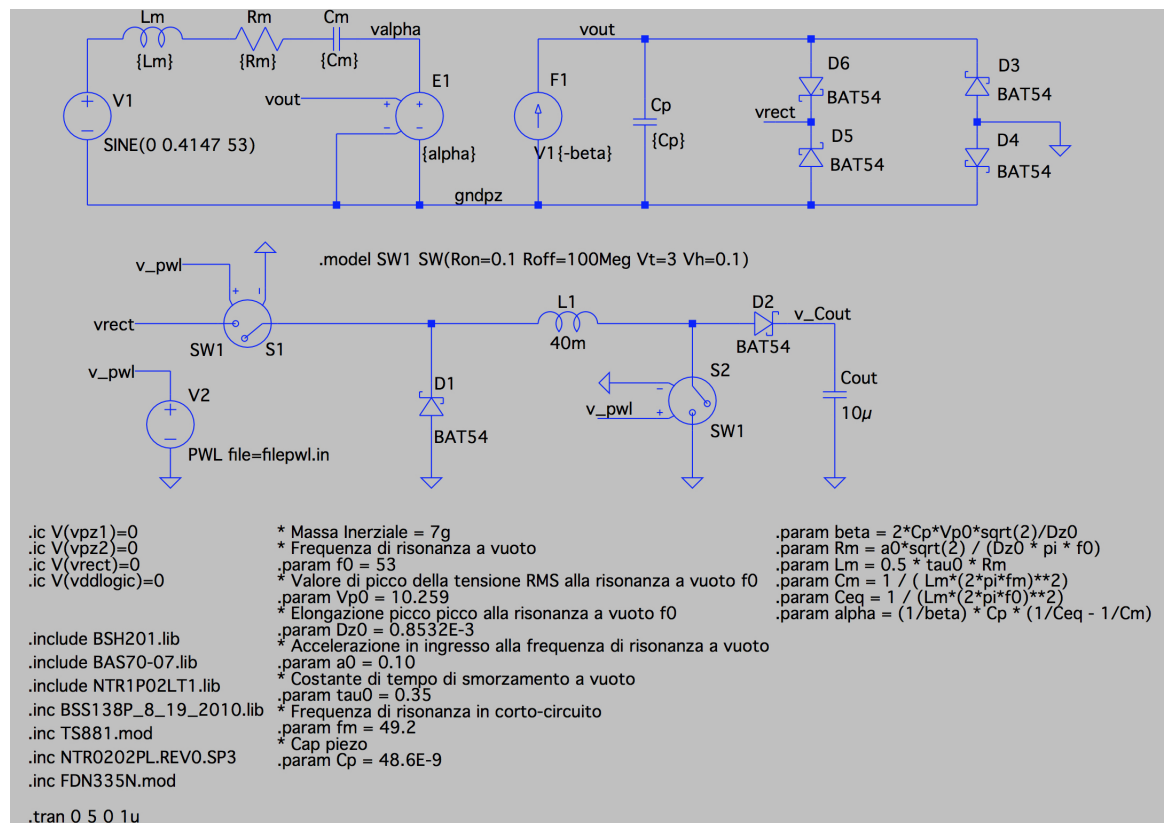


Figura 3.1: Modello elettromeccanico equivalente con rettificatore e conversione comandata tramite due switches ideali.

Il modello circuitale in Figura 3.1 sarà utilizzato sia per lo studio SECE sia per quello Q-SECE, dal momento che ciò che permette di controllare la conversione è il generatore  $V_2$ , comandato da un file con estensione *.in*. In questo file verranno definite le coppie tempo-tensione, date poi in ingresso alla funzione PWL (*Piecewise Linear*), la quale genererà impulsi sincroni o random, in base al tipo di conversione scelta. Viene riportato nel frammento di codice 3.1 la Netlist utilizzata per la simulazione.

```

1 * C:\Users\Alice\Desktop\Progetto\simulazioni.LTspice\QSECE.TESI.
   asc
2 E1 valpha gndpz vout gndpz {alpha}
3 Cp vout gndpz {Cp}
4 F1 gndpz vout V1{-beta}
5 Lm N001 N002 {Lm}
6 Rm N002 N003 {Rm}
7 Cm N003 valpha {Cm}
8 D1 0 N004 BAT54
9 L1 N004 N005 40m
10 D2 N005 v_Cout BAT54
11 Cout v_Cout 0 10
12 S1 N004 vrect v_pwl 0 SW1
13 V1 N001 gndpz SINE(0 0.4147 53)
14 D3 0 vout BAT54
15 D4 0 gndpz BAT54
16 D5 gndpz vrect BAT54
17 D6 vout vrect BAT54
18 S2 N005 0 v_pwl 0 SW1
19 V2 v_pwl 0 PWL file=filepwl.in
20 .model D D
21 .lib C:\PROGRA~2\LTC\LTSPIC~1\lib\cmp\standard.dio
22 .tran 0 5 0 1u
23 .inc BSS138P_8_19_2010.lib
24 .inc NTR0202PL.REV0.SP3
25 .inc FDN335N.mod
26 .inc TS881.mod
27 .ic V(vpz1)=0
28 .ic V(vpz2)=0
29 .ic V(vrect)=0
30 .ic V(vddlogic)=0
31 .include BAS70-07.lib
32 .include NTR1P02LT1.lib

```

```

33 .include BSH201.lib
34 .model SW1 SW(Ron=0.1 Roff=100Meg Vt=3 Vh=0.1)
35 * Massa Inerziale = 7g
36 * Frequenza di risonanza a vuoto
37 .param f0 = 53
38 * Valore di picco della tensione RMS alla risonanza a vuoto f0
39 .param Vp0 = 10.259
40 * Elongazione picco picco alla risonanza a vuoto f0
41 .param Dz0 = 0.8532E-3
42 * Accelerazione in ingresso alla frequenza di risonanza a vuoto in [g-
    RMS]
43 .param a0 = 0.10
44 * Costante di tempo di smorzamento a vuoto
45 .param tau0 = 0.35
46 * Frequenza di risonanza in corto-circuito
47 .param fm = 49.2
48 * Cap piezo
49 .param Cp = 48.6E-9
50 .param beta = 2*Cp*Vp0*sqrt(2)/Dz0
51 .param Rm = a0*sqrt(2) / (Dz0 * pi * f0)
52 .param Lm = 0.5 * tau0 * Rm
53 .param Cm = 1 / ( Lm*(2*pi*fm)**2)
54 .param Ceq = 1 / (Lm*(2*pi*f0)**2)
55 .param alpha = (1/beta) * Cp * (1/Ceq - 1/Cm)
56 .backanno
57 .end

```

Listing 3.1: Netlist LTspice del modello elettromeccanico per le conversioni SECE e Q-SECE

### 3.1.2 Descrizione del modello e interazione con Matlab

Dopo aver effettuato un'analisi *.ac* per la verifica della frequenza di lavoro del circuito, è stata scelta una sinusoide in ingresso a 53Hz per rappresentare la vibrazione meccanica, con un'ampiezza tale che la tensione massima d'uscita a vuoto non superi i 40V. La scelta di questo valore per la tensione in uscita è stata fatta tenendo conto che la presenza del ponte di diodi o rettificatore a doppia onda introduce delle cadute di tensione dovute alle soglie dei diodi utilizzati. Il segnale di comando *v\_pwl* viene dato in ingresso ai due *switches* ideali, le cui caratteristiche sono specificate nel *.model SW1*, ed è proprio l'apertura o la chiusura di questi interruttori che simula l'im-

pulso. Quando l'interruttore si chiude, si viene a formare un percorso che permette all'induttore  $L1$  di immagazzinare la carica, appena l'interruttore si riapre, si forma un cammino verso massa che scarica l'induttore e carica il condensatore  $C_{out}$ , detto capacità di *storage*. Tuttavia, ai fini della valutazione energetica, la grandezza che sarà "plottata" ed importata in uno script Matlab sarà la tensione in uscita dal modello elettromeccanico, cioè la tensione  $v_{out}$  ai capi del condensatore  $C_p$ , che verrà scaricato completamente ad ogni conversione.

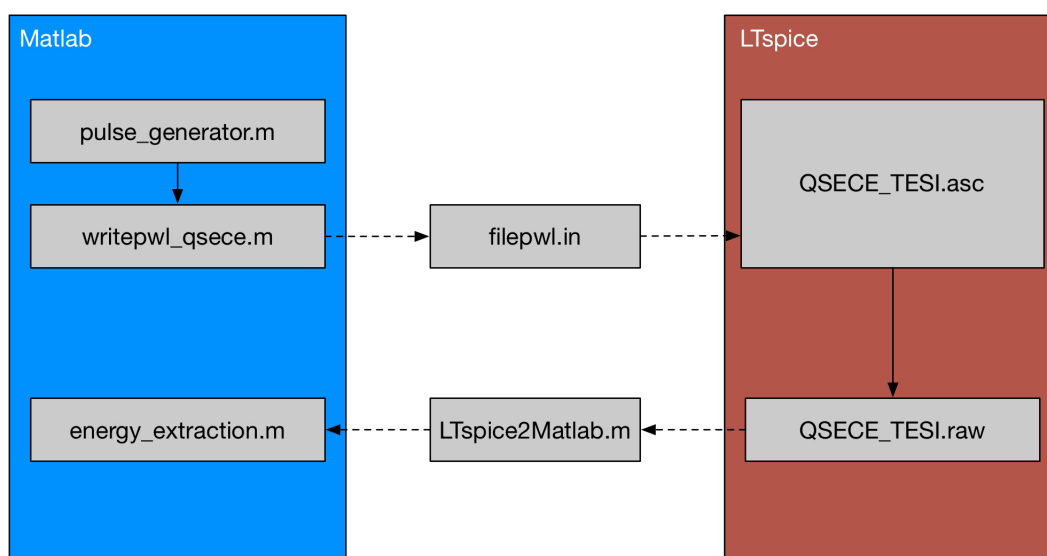


Figura 3.2: Schema logico dell'interazione tra Matlab e LTspice per la generazione di impulsi sincroni/random e calcolo dell'energia.

Lo schema in Figura 3.2 rappresenta l'idea che sta alla base di questo tipo di conversione, già analizzata in [3] ma apportando alcune modifiche al circuito e alla logica degli algoritmi per la generazione degli impulsi e il calcolo dell'energia estratta:

- nel modello circuitale è stato inserito il rettificatore e il circuito di controllo è costituito da due *switches* comandati dallo stesso segnale, mentre l'analisi della conversione SECE usata in [3] non prevede la presenza del ponte e il comando PWL viene dato in ingresso ad un solo *switch* posto in parallelo al carico;
- gli script Matlab generano degli impulsi randomizzati con ampiezza unitaria e di durata fissa, calcolata in base alla grandezza dell'induttore  $L1$ . Questa scelta è dovuta al fatto che, dallo studio preceden-

te [3] è emerso che randomizzare l'ampiezza dell'impulso e il suo  $\tau_{on}$  non porta alcun miglioramento in termini di energia estratta, pertanto la durata dell'impulso sarà tenuta fissa a  $70\mu s$  in modo da scaricare completamente la capacità  $C_p$ ;

- per il calcolo dell'energia estratta, è stata considerata la sommatoria dei quadrati delle tensioni  $v_{out}$  individuate dopo il fronte di salita dell'impulso in ogni conversione avvenuta e poi utilizzata la formula standard:

$$E = \frac{1}{2} C_p \sum_{i=1}^n V_i^2 \quad (3.1)$$

## 3.2 Algoritmi Matlab

In questa sezione verranno riportati i tre file con estensione *.m* utilizzati rispettivamente per la generazione degli impulsi sincroni e random e per calcolare l'energia estratta.

### 3.2.1 Generazione degli impulsi

Viene presentato ora il primo algoritmo per generare gli impulsi sincroni e random.

```

1 %% Generazione impulsi randomizzati %%
2 clear
3 close all
4 clc
5
6 % periodo di campionamento della forma d'onda nel tempo
7 time_resolution = 0.01e-3;
8 % frequenza e periodo della vibrazione
9 f = 53;
10 period = 1/f;
11
12 % numeri interi che servono per disabilitare alcuni impulsi
13 m_on = 1;
14 n_on = 2;
15
16 % durata della simulazione
17 end_time = 10;
18 % generazione vettore dei tempi

```



```

19 t = 0:time_resolution:end_time-time_resolution;
20 % generazione dei vettori di impulsi (sia per SECE che QSECE)
21 v = zeros(1,length(t));
22 v_jittered = zeros(1,length(t));
23 % grandezze dei tempi derivate
24 half_period = 0.5*period;
25 quarter_period = 0.25*period;
26
27 %% Estrazione Sincrona (SECE) %%
28 % vettori che contengono gli istanti in cui si verificano i picchi
29 positive_pulses_times = quarter_period:period:end_time;
30 negative_pulses_times = quarter_period+half_period:period:end_time;
31 % numero di campioni in un periodo, met\`a periodo e un quarto di
    periodo
32 step = (period/time_resolution);
33 half_step = (0.5*step);
34 quarter_step = (0.25*step);
35 % fase iniziale della forma d'onda periodica di impulsi
36 start_position = quarter_step;
37 % inseriamo 1 in corrispondenza dei picchi positivi
38 v(start_position:step:end) = 1;
39 % inseriamo -1 in corrispondenza dei picchi negativi
40 v((start_position +half_step):step:end) = -1;
41 % frequenza di campionamento
42 fs = 1/time_resolution;
43 % vettore delle frequenze per il calcolo della FFT
44 f = 0 : fs / length(v) : fs - 1 / length(v);
45
46 % grafici delle forme d'onda periodiche
47 figure('name','SECE');
48 subplot(2,1,1);
49 plot(t,v,'b.-');
50 xlabel('time[s]');
51 ylabel('voltage[V]');
52 xlim([0 1]);
53 subplot(2,1,2);
54 plot(f,abs(fft(v)),'b.-');
55 xlabel('frequency[Hz]');
56 ylabel('voltage gain[dB]');
57 xlim([0 1000]);
58

```

```

59 %% Estrazione Quasi Sincrona (QSECE) %%
60 % generazione dei vettori di impulsi ritardati e con ampiezza unitaria
61 delayed_positive_pulses_times = positive_pulses_times ;
62 delayed_negative_pulses_times = negative_pulses_times;
63 % disattivazione random di coppie di impulsi
64 on_off_pulses = zeros(1,length(delayed_positive_pulses_times));
65 % array di numeri random da 1 a n
66 tmp = randi(n_on,1,length(delayed_positive_pulses_times));
67 % riempimento di on_off_pulses con 1 quando il valore i-esimo di tmp <=
    m_on
68 on_off_pulses (tmp<=m_on) = 1;
69
70 % creazione dei ritardi randomizzati per i picchi positivi e negativi
71 for i = 1:length(delayed_positive_pulses_times)
72 random_delay_positive = half_period*rand-quarter_period;
73 random_delay_negative = half_period*rand-quarter_period;
74 delayed_positive_pulses_times (i) = delayed_positive_pulses_times (i) +
    random_delay_positive;
75 delayed_negative_pulses_times (i) = delayed_negative_pulses_times (i) +
    random_delay_negative;
76 position = 1+round(delayed_positive_pulses_times(i) / time_resolution);
77 v_jittered (position) = on_off_pulses (i);
78 position = 1+round(delayed_negative_pulses_times(i) / time_resolution);
79 v_jittered (position) = -on_off_pulses (i);
80 end;
81
82 % grafici della serie di impulsi ritardati
83 figure ('name','QSECE');
84 subplot(2,1,1);
85 plot(t, v_jittered, 'r.-');
86 xlabel('time[s]');
87 ylabel('voltage[V]');
88 xlim([0 1]);
89 subplot(2,1,2);
90 plot(f,abs(fft(v_jittered)), 'r.-');
91 xlabel('frequency[Hz]');
92 ylabel('voltage gain[dB]');
93 xlim([0 1000]);
94
95 %% Grafici sovrapposti %%
96 figure ('name','SECE/QSECE')

```

```

97 subplot(2,1,1)
98 plot(t,v,'b.-');
99 xlim([0 2]);
100 hold on;
101 plot(t, v_jittered , 'r.-');
102 xlabel('time[s]');
103 ylabel('voltage[V]');
104 xlim([0 2]);
105 subplot(2,1,2);
106 plot(f,abs(fft(v)), 'b.-');
107 xlim([0 1000]);
108 hold on;
109 plot(f,abs(fft(v_jittered)), 'r.-');
110 xlabel('frequency[Hz]');
111 ylabel('voltage gain[dB]');
112 xlim([0 1000]);

```

Listing 3.2: “pulse\_generator.m”: codice per la randomizzazione degli impulsi.

Nel frammento di codice 3.2 vi è il primo *script* con cui sono stati creati i due vettori, nei quali si è tenuto traccia dei *delay* casuali positivi e negativi, necessari per ritardare o anticipare la conversione rispetto al picco. Conoscendo la frequenza di risonanza e impostando un passo di campionamento di 0.01ms, è stato possibile individuare i picchi di tensione massima e associarli al loro rispettivo istante temporale. In questo modo è stata realizzata la conversione sincrona, come mostrano i grafici di Figura 3.3, ottenuti mandando in esecuzione il frammento di codice 3.2.

Per creare il ritardo casuale, invece, sono state create due variabili:

- ***on\_off\_pulses***: è la variabile con cui si decide se attivare o meno l'impulso;
- ***random\_delay\_positive*** e ***random\_delay\_negative***: sono due variabili che tengono traccia del numero creato tramite la funzione `rand` e che può assumere tutti i valori compresi nell'intervallo 0 e 1. Moltiplicando questo numero casuale per la metà del periodo e sottraendo un quarto del periodo si otterranno dei numeri positivi e negativi che cadranno entro l'intervallo  $-\frac{T}{4}$  e  $\frac{T}{4}$ .

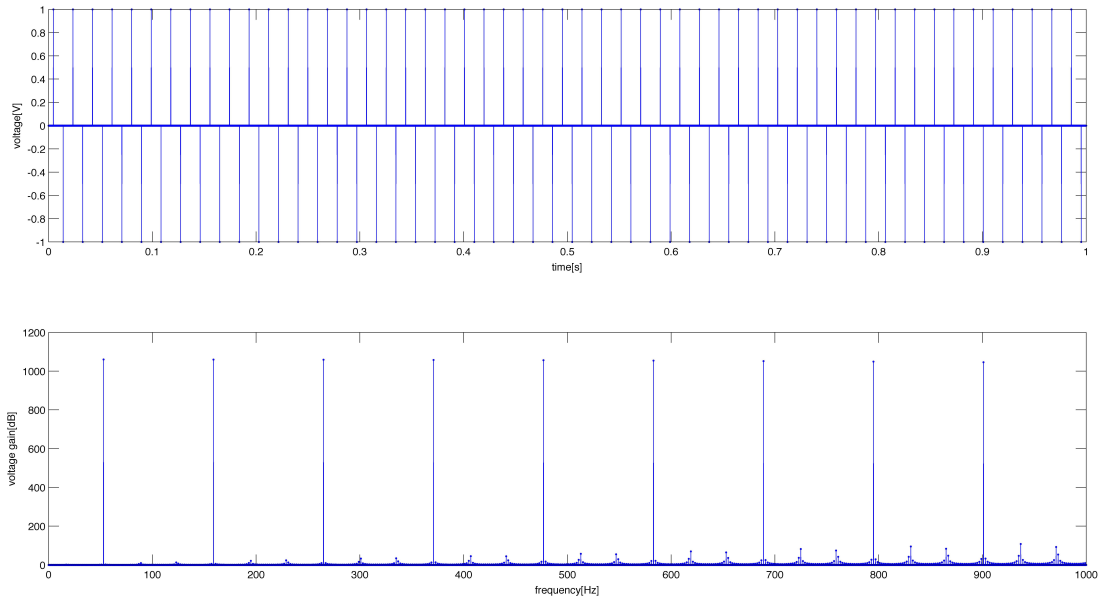


Figura 3.3: Impulsi sincroni positivi e negativi generati da Matlab e rispettiva FFT.

Inoltre, è possibile decidere la percentuale di impulsi attivi che si vuole avere durante la conversione grazie a  $m_{on}$  e  $n_{on}$ , due parametri che possono assumere valori interi positivi e che vengono utilizzati per disattivare i picchi di corrente. Nello *script* sopra, per esempio, sono stati considerati il 50% degli impulsi attivati, inizializzando  $m_{on} = 1$  e  $n_{on} = 2$ . Il loro rapporto rappresenta la probabilità che avvenga una conversione e la variabile *on\_off\_pulses* dipende proprio da questi due parametri. Nella Figura 3.4 si può osservare la sequenza di impulsi casuali e la loro FFT, che mostra come l'ampiezza della prima armonica si sia abbassata e distribuita su tutta la banda. In Figura 3.5 si possono vedere i grafici precedenti sovrapposti per confrontare gli impulsi ritardati o anticipati con un rapporto  $\frac{m}{n} = 50\%$  e considerati nell'intervallo di  $-\frac{T}{4}$  e  $\frac{T}{4}$ .

Già da questi primi grafici, osservando le FFT degli impulsi sincroni e asincroni, è possibile notare quel miglioramento delle prestazioni del caso Q-SECE, ricercato fin dall'inizio. Il fatto che l'ampiezza della prima armonica sia diminuita di circa tre volte rispetto l'ampiezza dell'armonica del caso SECE, dimostra che la conversione asincrona risente meno dell'effetto *damping*, dato che viene diminuita la componente di smorzamento.

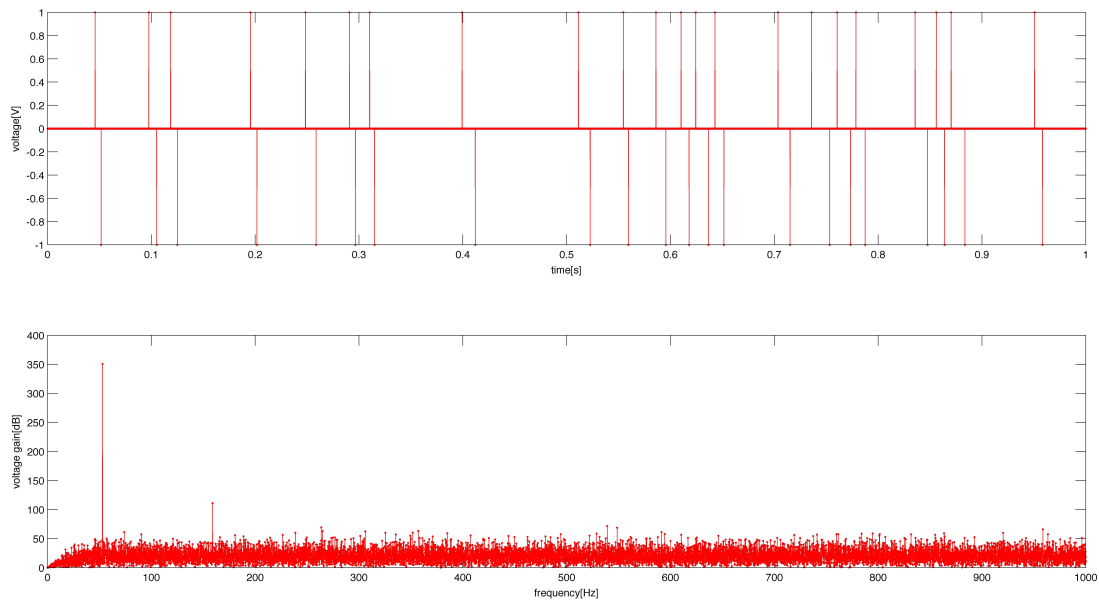


Figura 3.4: Impulsi random generati da Matlab e rispettiva FFT.

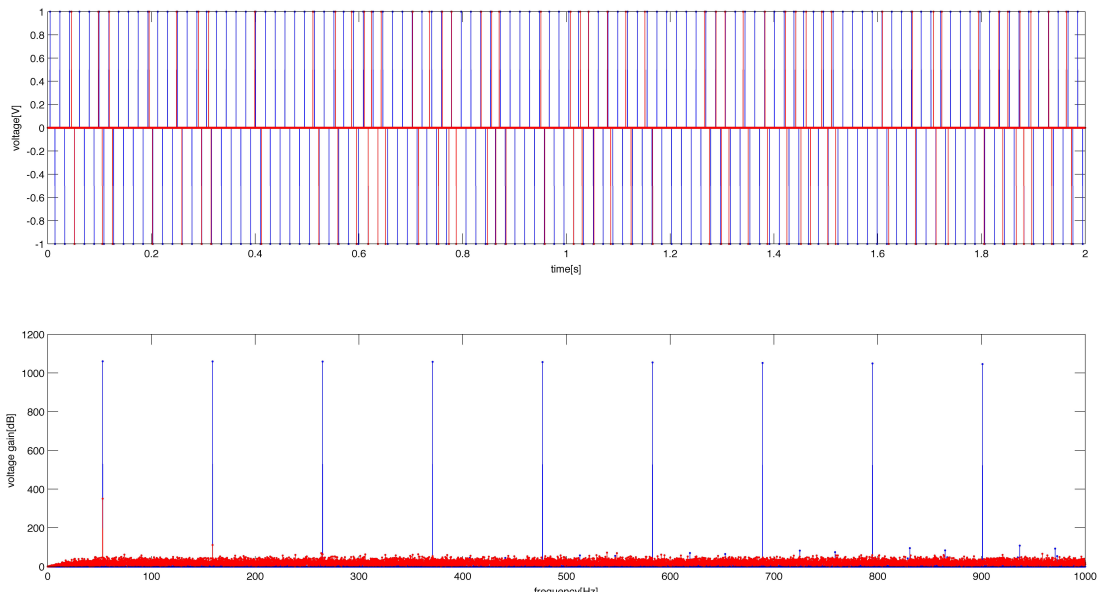


Figura 3.5: Sovrapposizione dei grafici precedenti.

### 3.2.2 Scrittura su file degli impulsi PWL

Nel frammento di codice 3.3 è riportato lo script che scrive nel file *filepwl.in* le coppie tempo-tensione prese in ingresso dalla funzione PWL.

```

1 %% Write a pwl-file QSECE for LTspice %%
2
3 % write a bucket '(' - LTspice wants it
4 fid = fopen('C:\Users\Alice\Desktop\Progetto\simulazioni_LTspice\
   filepwl.in', 'w');
5 fwrite(fid, '(', 'char');
6
7 % creo un array che contiene gli indici dove v_jittered = 1
8 length_test = find(v_jittered);
9 tempo = zeros(1,length(length_test));
10 tensione = zeros(1,length(length_test));
11
12 % inserisco in tempo i valori temporali corrispondenti a tensioni non
   nulle
13 k = 1;
14 for i = 1:length(t)
15     if v_jittered(i)~=0
16         tempo(k) = t(i);
17         tensione(k) = v_jittered(i);
18         k=k+1;
19     end
20 end;
21
22 % creo Ton (ovvero il tempo che deve durare l'impulso)
23 max_hold = 70e-6;
24 Ton = zeros(1,length(tensione));
25 for i = 1:length(tensione)
26     Ton(i)= max_hold;
27 end;
28
29 % creazione impulsi random
30 x = zeros(1,8*length(tempo));
31 % ritardo con cui far partire il treno di impulsi
32 init_delay = 1.4389;
33 % tensione minima e massima degli impulsi
34 tensione_minima = 0;
35 tensione_massima = 15;

```

```

36 % tempo salita e discesa
37 time_rise = 10e-12;
38 time_fall = 10e-12;
39
40 z = 1;
41 for i = 1:length(tempo)
42     x(z) = init_delay+tempo(i);
43     x(z+1) = tensione_minima;
44
45     % fronte salita
46     x(z+2) = x(z) + time_rise;
47     x(z+3) = tensione_massima;
48
49     % durata e tensione dell'impulso
50     x(z+4) = x(z+2) + Ton(i);
51     x(z+5) = tensione_massima;
52
53     % fronte discesa
54     x(z+6) = x(z+4) + time_fall;
55     x(z+7) = tensione_minima;
56
57     z=z+8;
58 end;
59
60 fprintf(fid, [' %0.12f 's' ' %i' 'V' ...
61             ' %0.12f 's' ' %i' 'V' ...
62             ' %0.12f 's' ' %i' 'V' ...
63             ' %0.12f 's' ' %i' 'V' ...
64             ' %0.12f 's' ' %i' 'V' ...
65             ' %0.12f 's' ' %i' 'V' ...
66             ' %0.12f 's' ' %i' 'V' ...
67             ' %0.12f 's' ' %i' 'V' ...
68             ' %0.12f 's' ' %i' 'V' ...
69             ' %0.12f 's' ' %i' 'V' ...
70             ' %0.12f 's' ' %i' 'V' ...
71             ' %0.12f 's' ' %i' 'V' ...
72             ' %0.12f 's' ' %i' 'V' ...
73             ' %0.12f 's' ' %i' 'V' ...
74             ' %0.12f 's' ' %i' 'V' ...
75             ' %0.12f 's' ' %i' 'V' ...
76             ' %0.12f 's' ' %i' 'V' ...

```

```

77         ,      %0.12f 's' ,      %i' 'V' ...
78         ,      %0.12f 's' ,      %i' 'V' ...
79         ,      %0.12f 's' ,      %i' 'V' ...
80         ,      %0.12f 's' ,      %i' 'V' ...
81         ,      %0.12f 's' ,      %i' 'V' ...
82         ,      %0.12f 's' ,      %i' 'V' ...
83         ,      %0.12f 's' ,      %i' 'V' ...
84         ,      %0.12f 's' ,      %i' 'V' ...
85         ,      %0.12f 's' ,      %i' 'V' ...
86         ,      %0.12f 's' ,      %i' 'V' ...
87         ,      %0.12f 's' ,      %i' 'V' ...
88         ,      %0.12f 's' ,      %i' 'V' ...
89         ,      %0.12f 's' ,      %i' 'V' ...
90         ,      %0.12f 's' ,      %i' 'V' ...
91         ,      %0.12f 's' ,      %i' 'V' ...
92         ,      %0.12f 's' ,      %i' 'V' ...
93         ,      %0.12f 's' ,      %i' 'V' ...
94         ,      %0.12f 's' ,      %i' 'V' ...
95         ,      %0.12f 's' ,      %i' 'V' ...
96         ,      %0.12f 's' ,      %i' 'V' ...
97         ,      %0.12f 's' ,      %i' 'V' ...
98         ,      %0.12f 's' ,      %i' 'V' ...
99         ,      %0.12f 's' ,      %i' 'V' ...
100        '\r\n ',x);
101
102 figure('name','QSECE/PWL')
103 plot(t, v_jittered , 'r.-');
104 xlabel('time[s]')
105 ylabel('voltage[V]')
106 xlim([0 2]);
107 hold on;
108 plot(x(1:2:end),x(2:2:end),'g.-');
109 xlim([0 2]);
110 % go four steps back in the file (that's where the carriage return '\r'
    is)
111 fseek(fid, -4, 0);
112 % overwrite the '\r\n' with a closing bracket ')' - PSpice needs it
113 fwrite(fid, ['' ')'], 'char');
114 fclose(fid);

```

Listing 3.3: “writepwl\_qsece.m”: codice per la generazione degli impulsi.



Lo stesso *script* viene usato anche per la creazione degli impulsi sincroni, sostituendo nel primo ciclo *for* il vettore  $v$  al posto di  $v\_jittered$ : entrambi i vettori sono stati precedentemente creati mandando in esecuzione lo *script* *pulse\_generator.m* con la differenza che  $v$  tiene traccia dei valori di tensione relativi ai picchi massimi e minimi, mentre  $v\_jittered$  contiene i valori di tensione ritardati o anticipati rispetto ai picchi. Con il secondo ciclo *for* vengono creati i quattro punti per ogni impulso, descritti dalla coppia tempo-tensione e inseriti ciclicamente nel file che verrà dato in ingresso a LTspice.

### 3.2.3 Calcolo dell'energia

Nel frammento di codice 3.4 si trova lo *script* Matlab utilizzato per il calcolo dell'energia estratta. Dopo aver concluso la simulazione LTspice, viene importato nel workspace di Matlab il file *.raw* tramite la funzione open source ***LTspice2Matlab.m***. Questa funzione crea una struttura, all'interno della quale vi è una matrice chiamata *variable\_mat* contenente tutti i valori assunti dalle variabili del modello elettromeccanico simulato (in riga) in funzione del tempo (in colonna). I dati di interesse ai fini del calcolo dell'energia estratta sono  $v_{piezo} = v_{out} - v_{gndpz}$ , ovvero la differenza di potenziale ai capi del condensatore  $C_p$  e  $v_{pwl}$  che rappresenta il segnale di conversione. Con un ciclo *for* vengono sommati i quadrati delle tensioni  $v_{piezo}$  nell'istante in cui avviene una conversione ed è appena terminato il fronte di salita dell'impulso, utilizzando la formula:

$$E = \sum_{i=1}^n E_i = \frac{1}{2} C_p \sum_{i=1}^n V_i^2 \quad (3.2)$$

dove  $V_i$  è la tensione ai capi del piezo all'inizio dell' $i$ -esima conversione.

```

1 %% Analisi dell' energia attraverso i dati elaborati da LTspice %%
2
3 dati = LTspice2Matlab('C:\Users\Alice\Desktop\Progetto\
  simulazioni.LTspice\QSECE_TESI.raw');
4 % salvo il vettore dei tempi
5 time = dati.time_vect;
6 % salvo la differenza fra vout e vgndpz in v_piezo tramite la differenza
  tra due righe
7 v_piezo = dati.variable_mat(3,:) - dati.variable_mat(2,:);
8 % salvo i picchi di tensione in v_pwl
9 v_pwl = dati.variable_mat(11,:);
10
```

```

11 v_square_sum = 0;
12
13 for i = 2:dati.num_data_pnts
14     if v_pwl(i) == 15 && v_pwl(i) > v_pwl(i-1)
15         v_square_sum = v_square_sum + (v_piezo(i))^2;
16     end
17 end
18
19 Cp = 48.6e-9;
20 % Energia[J] estratta durante la conversione
21 energy = 0.5 * Cp * v_square_sum;

```

Listing 3.4: “energy\_extraction.m”: codice per il calcolo dell’energia in Joule.

### 3.3 Valutazioni e Confronto dei metodi

In quest’ultima parte verranno confrontati i risultati ottenuti dalle conversioni SECE e Q-SECE, variando il range entro il quale si vuole avere il ritardo e variando la probabilità che gli impulsi si attivino. Ai fini di una corretta valutazione saranno eseguite simulazioni con le variabili *random\_delay\_positive* e *random\_delay\_negative* che spaziano tra:

- $[-\frac{T}{4}, \frac{T}{4}]$
- $[-\frac{T}{8}, \frac{T}{8}]$
- $[-\frac{T}{16}, \frac{T}{16}]$
- $[-\frac{T}{32}, \frac{T}{32}]$

e variando il rapporto di *m\_on* e *n\_on* per avere una percentuale di impulsi attivati per ogni conversione di:

- 20%
- 40%
- 60%
- 80%

- 100%

Per restringere il range del periodo entro cui far cadere l'impulso, occorrerà modificare il primo *script*, dimezzando le variabili *half\_period* e *quarter\_period*. Per esempio, se si vuole convertire nell'intervallo  $-\frac{T}{8}$  e  $\frac{T}{8}$ , occorrerà scrivere *random\_delay\_positive*=*quarter\_period*\**rand*-(0.5\**quarter\_period*).

Le simulazioni verranno fatte tutte alla frequenza di risonanza  $f_0 = 53\text{Hz}$ , eseguendo un'analisi in transitorio *.tran* della durata di 10 secondi. Tuttavia, il segnale di conversione partirà con un certo ritardo, appositamente scelto per far sì che il circuito sia entrato in risonanza e di conseguenza la durata effettiva della conversione sarà inferiore ai dieci secondi impostati.

### 3.3.1 Analisi delle forme d'onda

La Figura 3.6 mostra l'andamento della tensione *vout* nel caso SECE: appena iniziano le conversioni si nota un aumento della tensione picco picco che viene subito attenuata a causa dell'effetto *damping*. Si fa presente che in un trasduttore ideale l'ampiezza picco picco sarebbe dovuta essere doppia rispetto a quella a circuito aperto.

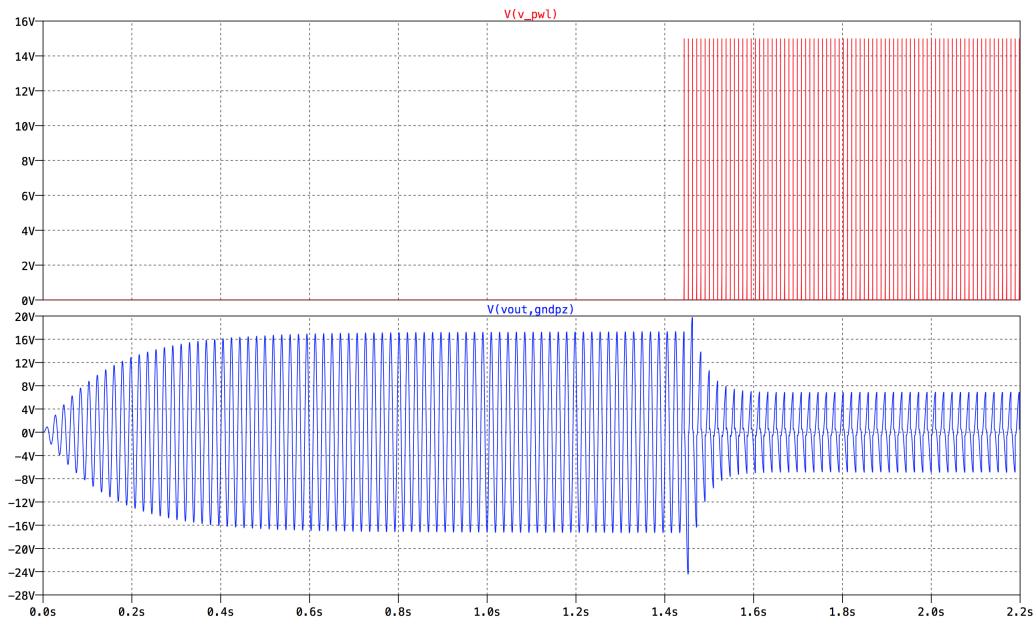


Figura 3.6: Conversione SECE con  $\frac{m}{n} = 50\%$  e impulsi compresi tra  $[-\frac{T}{4}, \frac{T}{4}]$ . La forma d'onda in blu rappresenta la *vout* mentre in rosso sono raffigurati gli impulsi sincroni.

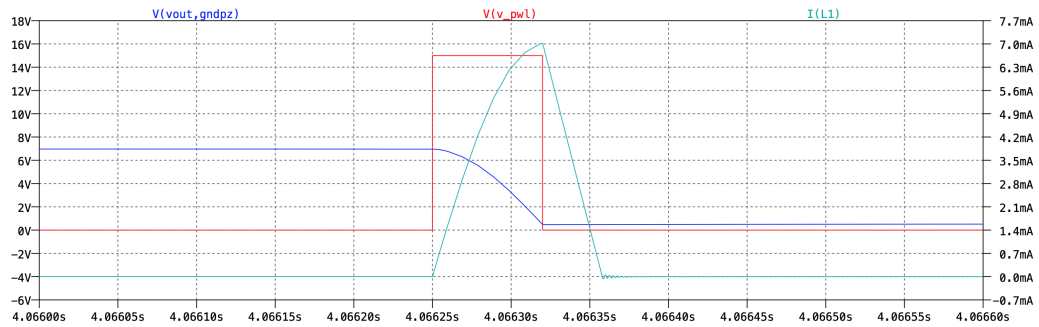


Figura 3.7: Zoom della tensione in uscita sul piezo: la durata dell'impulso fissa a  $70\mu\text{s}$  permette al piezo di scaricarsi completamente. Contemporaneamente la corrente sull'induttore  $L_1$  cresce durante tutto il processo di scarica di  $C_p$  e raggiunge il suo massimo quando  $v_{out}$  arriva a zero.

La Figura 3.8, invece, mostra l'andamento della tensione in uscita al modello elettromeccanico durante una conversione Q-SECE: quando inizia la conversione, la  $v_{out}$  presenta dei picchi di tensione più alti quanto più ci si allontana dal picco massimo o minimo, e questo tipo di modello non risente dell'attenuazione dovuta al *damping*, nonostante il circuito lavori in risonanza.

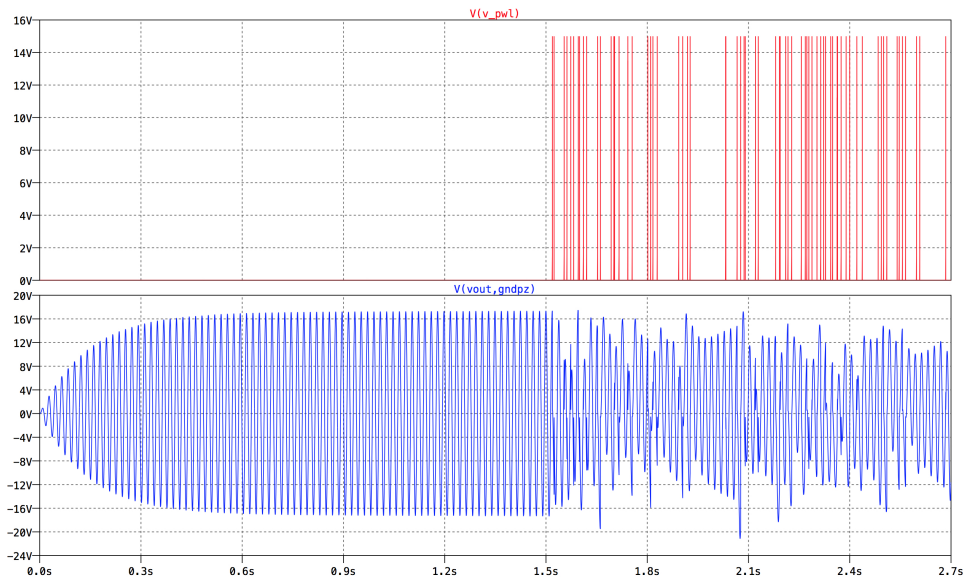


Figura 3.8: Conversione Q-SECE con  $\frac{m}{n} = 50\%$  e impulsi compresi tra  $[-\frac{T}{4}, \frac{T}{4}]$ .

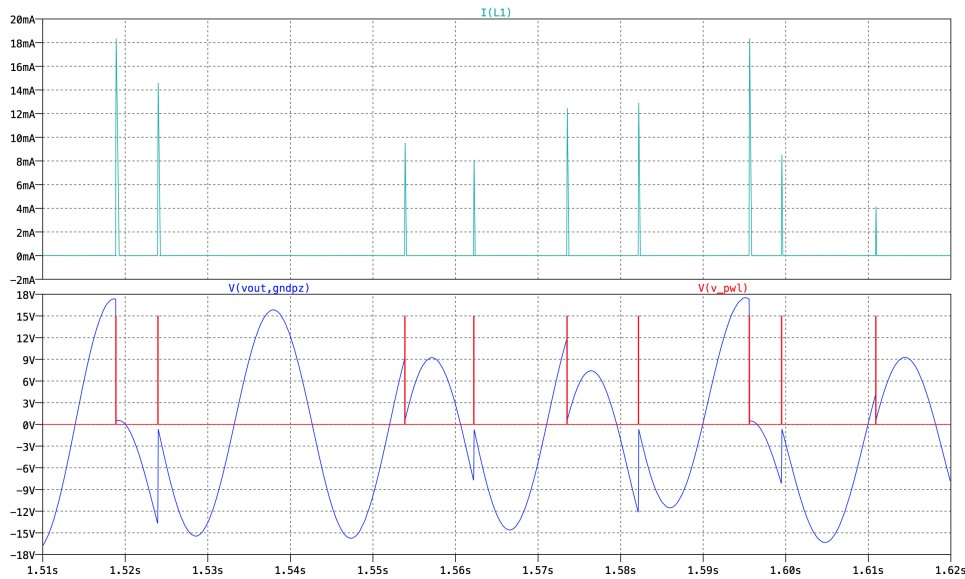


Figura 3.9: Zoom della forma d'onda di tensione in uscita dal piezo con conversione Q-SECE.

### 3.3.2 Stima Energetica

Segue ora la tabella per il confronto delle simulazioni eseguite per il calcolo dell'energia estratta ad ogni conversione.

I risultati ottenuti da queste simulazioni sono in perfetto accordo con i risultati teorici di cui si è parlato nel capitolo 1 e che sono stati sperimentalmente misurati in [2]. Nonostante nella maggior parte delle configurazioni, la conversione Q-SECE risulti migliore di quella SECE, il massimo rendimento ottenuto si ha nella configurazione con *period* compreso nell'intervallo  $[-\frac{T}{4}, \frac{T}{4}]$  e  $\frac{m}{n} = 50\%$  ed è pari a +1.3.

Utilizzando la tecnica Q-SECE si ha quindi un incremento delle prestazioni energetiche del +30% rispetto alla tecnica di estrazione SECE. Tuttavia, sono presenti anche configurazioni dove le prestazioni energetiche si degradano rispetto al caso SECE e scendono sotto l'unità. L'energia calcolata con il terzo algoritmo matlab per la conversione SECE risulta essere:  $1.11332286 \times 10^{-3} J$ .

Period	$m_{on}$	$n_{on}$	%	Energy[mJ]	$\frac{E_{q-sece}}{E_{sece}}$
$\frac{T}{4}$	1	5	20	0.8506	0.7641
	2	5	40	1.1378	1.0220
	3	5	60	1.3621	1.2235
	4	5	80	1.4256	1.2806
	5	5	100	1.4456	1.2985
$\frac{T}{8}$	1	5	20	1.1233	1.0090
	2	5	40	1.3426	1.2060
	3	5	60	1.3762	1.2362
	4	5	80	1.3013	1.1689
	5	5	100	1.2292	1.1041
$\frac{T}{16}$	1	5	20	1.1428	1.0265
	2	5	40	1.3547	1.2169
	3	5	60	1.3440	1.2072
	4	5	80	1.2414	1.1151
	5	5	100	1.1371	1.0214
$\frac{T}{32}$	1	5	20	1.1097	0.9967
	2	5	40	1.3446	1.2078
	3	5	60	1.3178	1.1837
	4	5	80	1.2214	1.0971
	5	5	100	1.1199	1.0059

Tabella 3.1: Risultati delle simulazioni con periodo e probabilità variabile.

Partendo dai dati inseriti in tabella 4.1, è stato graficato l'andamento del rapporto  $\frac{E_{q-sece}}{E_{sece}}$  in funzione della probabilità di conversione e del periodo entro cui far cadere gli impulsi. Il grafico disegnato è molto simile a quello di Figura 1.8: il rendimento maggiore, corrispondente a +1.29 trovato sperimentalmente, si ritrova in corrispondenza di valori di probabilità prossimi al 100% e in un ampio range del periodo.

Si è cercato allora un confronto tra l'energia estratta con conversione SECE utilizzando il modello circuitale usato in [3], e il modello presentato in questa tesi con il rettificatore.

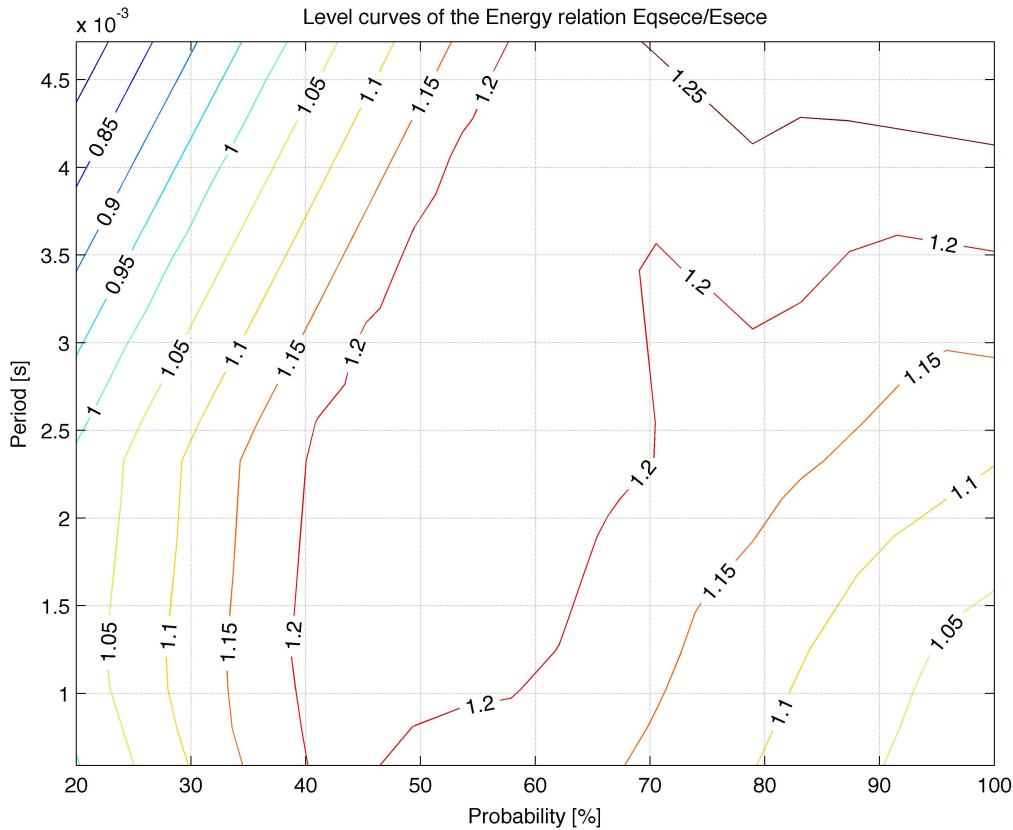


Figura 3.10: Andamento del rendimento energetico in funzione della probabilità di conversione e del periodo entro cui cadono gli impulsi.

Utilizzando il software LTspice, sono stati simulati entrambi i circuiti alla stessa frequenza di risonanza  $f_o = 53Hz$ , facendo in modo che entrambi producessero una tensione d'uscita a vuoto ai capi del piezo pari ad 1V, mantenendo invariati i parametri del modello elettromeccanico e utilizzando per entrambi lo *script write\_pwl* per il caso SECE (usando  $v$  al posto di  $v_{jittered}$ ).

Per prima cosa, sono stati inseriti in entrambi i circuiti i valori dell'ampiezza della sinusoide in ingresso, rispettivamente di 0.0113698V nel caso SECE con rettificatore e 0.01007V nel caso di SECE usato in [3], per avere una  $v_{out}$  a vuoto pari a 1V. Mandando in simulazione entrambi, si nota che l'effetto damping si fa sentire maggiormente nel circuito SECE usato in [3]; come si può notare nelle Figure 3.11 e 3.12, nel primo caso vi è un'attenuazione della tensione in uscita molto maggiore. La  $v_{out}$  del SECE usato in [3] passa da 1V a 0.209V mentre la  $v_{out}$  del SECE con rettificatore scende da 1V a 0.463V.

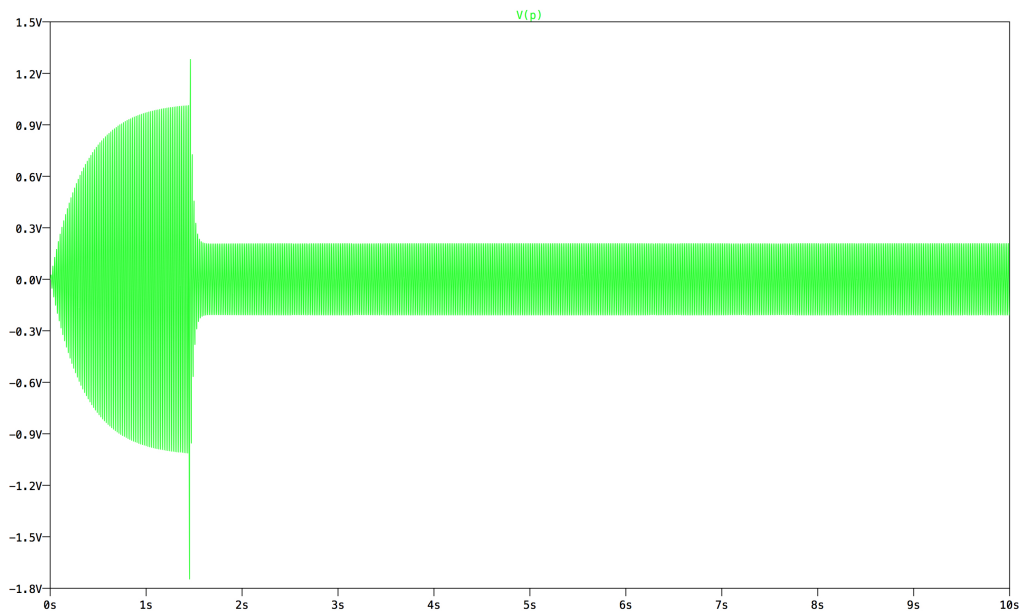


Figura 3.11: Tensione  $v_{out}$  del SECE usato in [3] con conversione sincrona e attenuazione a 0.2V dovuta al damping

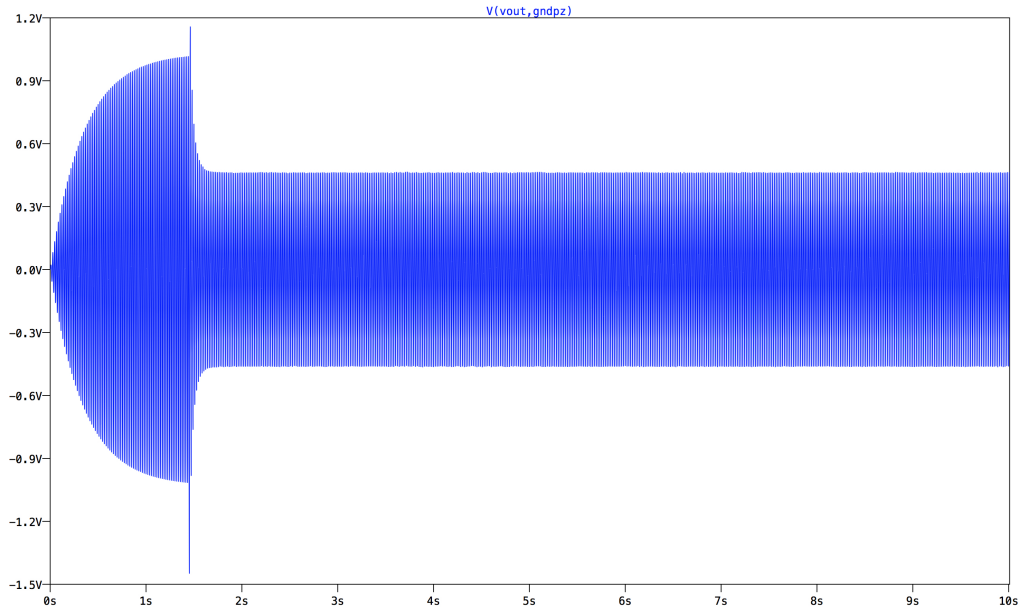


Figura 3.12: Tensione  $v_{out}$  del SECE con rettificatore con conversione sincrona e attenuazione a 0.4V dovuta al damping

Calcolando poi l'energia estratta da queste due simulazioni, si ottengono



valori che differiscono di quasi un ordine di grandezza: l'energia estratta dal SECE usato in [3] è di  $7.63027 \times 10^{-7}$  mentre l'energia estratta dal SECE con rettificatore è di  $4.78988 \times 10^{-6}$ . Questi risultati mostrano che l'accoppiamento elettromeccanico nel circuito con il rettificatore è più debole e attenua di meno rispetto al SECE usato in [3]. Questo minor effetto damping porta quindi ad avere un rendimento tra conversione Q-SECE e SECE inferiore al +2.8 trovato nelle simulazioni in [3].



# Capitolo 4

## SSHI-parallel

In questo capitolo verrà analizzata un'altra tecnica di estrazione, il cui comportamento è già stato studiato nel Capitolo 2. Le informazioni relative a questo tipo di implementazione e al suo funzionamento sono state prese da [4]. Dopo una breve introduzione al metodo SSHI (“*Synchronized Switch Harvesting on Inductor*”), verrà simulato il circuito corrispondente al modello SSHI-parallel con il Software LTspice e verrà stimata l'energia estratta con questo tipo di conversione nel caso sincrono, tramite un algoritmo Matlab.

### 4.1 Approccio al modello

La tecnica di estrazione SSHI consiste in una repentina inversione della tensione in uscita dal circuito equivalente del trasduttore piezoelettrico mantenendo il sincronismo della struttura ed utilizzando un'interfaccia per l'estrazione della carica costituita da uno *switch* e un induttore, seguiti dal rettificatore ac-dc e dal condensatore di *storage*. Lo *switch* si apre quando viene individuato un massimo o un minimo della vibrazione prodotta dal piezoelettrico e ciò produce una tensione costante a tratti proporzionale al segno della velocità che aumenta la tensione *vout* in uscita dal piezo [4].

Il vantaggio della tecnica SSHI consiste nel fatto che, invertendo la tensione del piezo proprio nel momento in cui il rettificatore si spegne, cosa che accade nei picchi di elongazione, viene introdotto un offset tale da portare il rettificatore di nuovo sulla soglia della conduzione, all'inizio della nuova elongazione picco picco. Quindi, nel caso ideale, il rettificatore conduce sempre e tutta la carica del piezo viene portata sul condensatore di uscita. Un altro aspetto vantaggioso è rappresentato dall'aumento delle prestazioni energetiche del circuito, che usa meno del 3% dell'energia elettrostatica presente nel trasduttore per auto alimentarsi. Tuttavia il processo di *switching*, dovuto al

rilevamento del picco massimo e minimo, introduce un ritardo di fase  $\phi$  che si traduce in un ritardo nel dominio dei tempi tra il momento in cui avviene la conversione e l'istante in cui avviene l'inversione di tensione. Questo ritardo va a degradare la crescita della tensione d'uscita e compromette la tensione costante a tratti che non risulta più proporzionale alla velocità, producendo un effetto di irrigidimento del piezo.

Come descritto in [4], è stato sperimentalmente provato che l'effetto di questo ritardo è limitato ad un *range* di *delay*, che cresce tanto più l'accoppiamento elettromeccanico si fa sentire. È stato anche provato che per l'approccio SSHI-parallel il ritardo negativo ha un maggiore impatto sulla performance del circuito rispetto a quello positivo, mentre gli effetti del *delay* nella configurazione SSHI-series sono simmetrici e paragonabili a quelli del ritardo negativo del caso parallelo.

#### 4.1.1 Configurazioni SSHI

Nelle Figure 4.1 e 4.2, vengono mostrate le due configurazioni con cui è possibile implementare la tecnica SSHI .

In questo capitolo sarà presa in considerazione l'interfaccia con *switch* e induttore in parallelo, visto che dai risultati sperimentali ottenuti in [4] è emerso che la tecnica parallelo presenta una *performance* migliore rispetto al caso ideale (senza ritardo) per i valori del ritardo positivo.

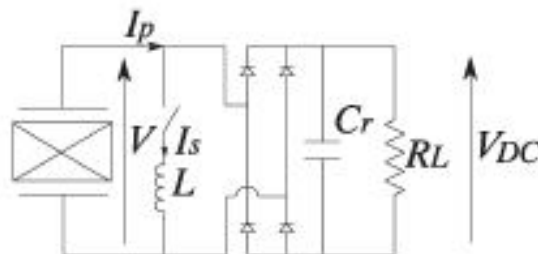


Figura 4.1: Configurazione SSHI con switch e induttore in parallelo [4]

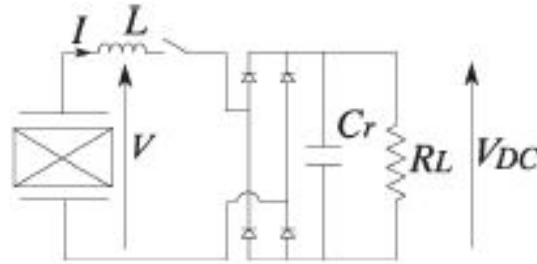


Figura 4.2: Configurazione SSHI con switch e induttore in serie[4].

Osservando l'interfaccia di nostro interesse, si può notare che l'SSHI parallel è composto da un circuito di conversione non lineare connesso in parallelo al modello elettromeccanico. Nello stesso momento in cui viene rilevato un massimo o un minimo e lo *switch* si chiude, si viene a formare un circuito oscillante  $L - C_o$ : nel frattempo lo *switch* viene tenuto chiuso fino a che la tensione in uscita dal piezoelettrico non viene ribaltata. Il processo di *energy harvesting* avviene prima di questo ribaltamento.

Per questo studio, l'impulso che determina l'istante di conversione viene implementato attraverso un generatore di tensione che ha in ingresso un impulso con ampiezza 3V, che parte con un secondo di ritardo da quando viene lanciata la conversione. Il segnale in uscita CONV viene direttamente fornito in ingresso allo *switch* in parallelo.

#### 4.1.2 Effetti del ritardo

Il *delay* dovuto allo *switching*, causato da una rilevazione non precisa del massimo o minimo nel caso reale, da un punto di vista meccanico porta ad un effetto di irrigidimento del trasduttore e conseguentemente all'effetto *damping* visto precedentemente. Per la tecnica SSHI-parallel, i ritardi positivi (conversione dopo il picco) e quelli negativi (conversione prima del picco) hanno effetti differenti sul sistema. Infatti, come è possibile vedere nella Figura 4.3 (b), il ritardo positivo comporta due configurazioni di circuito aperto.

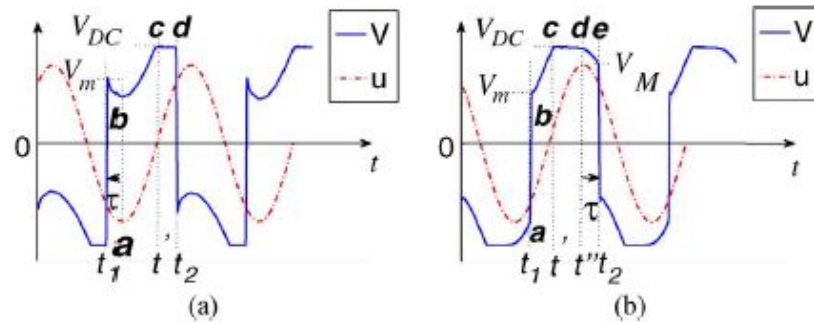


Figura 4.3: Forme d'onda SSHI-parallel con ritardo negativo (a) e ritardo positivo (b) [4].

Quando si ha un ritardo negativo, lo *switch* si apre prima che si verifichi il picco, mentre quando si ha un ritardo positivo lo *switch* si apre dopo aver rilevato lo spostamento ottimo. Analizzando i due casi si ha:

- ritardo negativo: la tensione in uscita dal piezoelettrico aumenta e diminuisce seguendo l'andamento della vibrazione meccanica, prima che venga raggiunto il picco massimo o minimo. Per calcolare l'energia estratta durante questo processo di conversione è necessario integrare il prodotto della tensione in uscita a regime (tra gli estremi c-d in figura) per la corrente richiesta dal carico;
- ritardo positivo: osservando la Figura 4.3 (b), si nota che la forma d'onda della tensione in uscita diventa una combinazione di più stati. In particolare si ha che, dopo che è avvenuta l'inversione e la *vout* ha raggiunto il suo massimo valore, segue una configurazione di circuito aperto (b-c), successivamente tra gli stati c-d avviene il processo di estrazione, si ritorna in configurazione di circuito aperto (d-e) ed infine si ha di nuovo l'inversione (a-b) [4]. Anche in questo caso, l'energia estratta è il risultato dell'integrale nel tempo del prodotto della tensione in uscita a regime e della corrente che scorre verso il rettificatore (stato c-d).

Si passerà ora alla simulazione LTspice della tecnica SSHI-parallel e all'analisi delle forme d'onda ottenute.

## 4.2 Simulazione LTspice

Nella Figura 4.4 è disegnato il modello elettromeccanico con rettificatore implementando la tecnica SSHI-parallel. Sono stati presi gli stessi valori per il modello elettromeccanico utilizzati per le simulazioni del capitolo 3: è stata fornita in ingresso la stessa sinusoide a 53Hz con ampiezza tale da avere una  $v_{out}$  a vuoto a circa 7V.

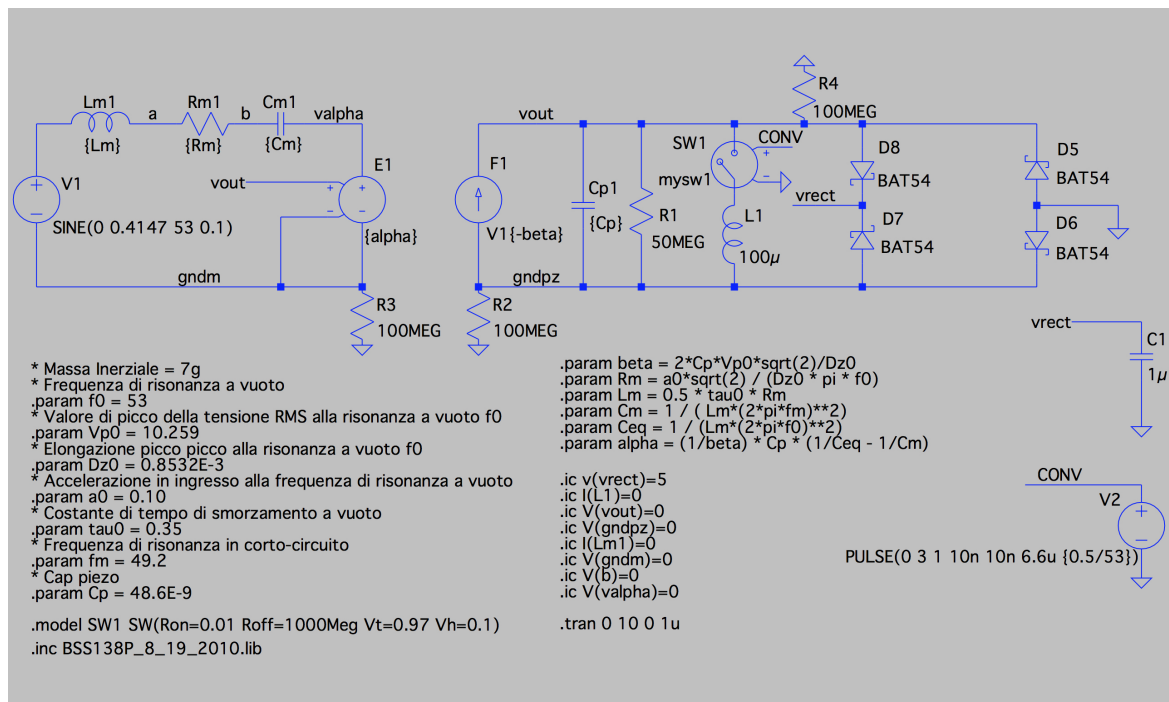


Figura 4.4: Modello elettromeccanico con rettificatore e tecnica SSHI-parallel

Il frammento di codice 4.1 mostra la Netlist relativa al circuito in Figura 4.4, usata in LTSpice. Per la simulazione è stata fatta un'analisi in transitorio .tran della durata di 10 secondi, con passo di campionamento di  $1\mu s$ .

```

1 * C:\Users\Alice\Desktop\Progetto\simulazioni_LTspice\SSHI_rectifier_v2.
  asc
2 Smysw1 N002 vout CONV 0 SW1
3 L1 gndpz N002 100 Rser=1
4 E1 valpha gndm vout gndm {alpha}
5 Cp1 vout gndpz {Cp}
6 F1 gndpz vout V1{-beta}
7 Lm1 N001 a {Lm}

```

```

8 Rm1 a b {Rm}
9 Cm1 b valpha {Cm}
10 V1 N001 gndm SINE(0 0.4147 53 0.1)
11 D5 0 vout BAT54
12 D6 0 gndpz BAT54
13 D7 gndpz vrect BAT54
14 D8 vout vrect BAT54
15 C1 vrect 0 1
16 R1 vout gndpz 50MEG
17 R2 gndpz 0 100MEG
18 R3 gndm 0 100MEG
19 R4 0 vout 100MEG
20 V2 CONV 0 PULSE(0 3 1 10n 10n 6.6u {0.5/53})
21 .model D D
22 .lib C:\PROGRA~2\LTC\LTSPIC~1\lib\cmp\standard.dio
23 .ic v(vrect)=5
24 .ic I(L1)=0
25 .ic V(vout)=0
26 .ic V(gndpz)=0
27 .ic I(Lm1)=0
28 .ic V(gndm)=0
29 .ic V(b)=0
30 .ic V(valpha)=0
31
32 .tran 0 10 0 1u
33 .inc BSS138P_8_19_2010.lib
34 .model SW1 SW(Ron=0.01 Roff=1000Meg Vt=0.97 Vh=0.1)
35 * Massa Inerziale = 7g
36 * Frequenza di risonanza a vuoto
37 .param f0 = 53
38 * Valore di picco della tensione RMS alla risonanza a vuoto f0
39 .param Vp0 = 10.259
40 * Elongazione picco picco alla risonanza a vuoto f0
41 .param Dz0 = 0.8532E-3
42 * Accelerazione in ingresso alla frequenza di risonanza a vuoto in [g-
    RMS]
43 .param a0 = 0.10
44 * Costante di tempo di smorzamento a vuoto
45 .param tau0 = 0.35
46 * Frequenza di risonanza in corto-circuito
47 .param fm = 49.2

```



```
48 * Cap piezo
49 .param Cp = 48.6E-9
50 .param beta = 2*Cp*Vp0*sqrt(2)/Dz0
51 .param Rm = a0*sqrt(2) / (Dz0 * pi * f0)
52 .param Lm = 0.5 * tau0 * Rm
53 .param Cm = 1 / ( Lm*(2*pi*f0)**2)
54 .param Ceq = 1 / (Lm*(2*pi*f0)**2)
55 .param alpha = (1/beta) * Cp * (1/Ceq - 1/Cm)
56 .backanno
57 .end
```

Listing 4.1: Netlist LTspice del modello elettromeccanico per le conversioni SSHI.parallel

La conversione viene controllata comandando lo *switch* in parallelo tramite il segnale CONV, generato dal generatore di tensione V2. Questa soluzione è stata scelta per realizzare una conversione sincrona, impostando il ritardo del segnale PULSE per trovare il massimo o minimo spostamento.

Un altro modo per implementare la conversione SSHI sincrona, prevede un rilevatore di picco ed un comparatore, come è stato utilizzato per le misure sperimentali in [4].

Una volta eseguita la simulazione, sono state ottenute delle forme d'onda che rispecchiano l'andamento previsto e analizzato in [4].

Si può vedere nella Figura 4.5 che la tensione in uscita dal piezo *vout*, una volta iniziata la conversione, rispetta le forme d'onda descritte in [4]; in una prima fase si presentano i ritardi negativi e dopo un assestamento cominciano a presentarsi i ritardi positivi. L'inversione della tensione porta, come previsto, ad un aumento della *vout*, che in questo caso passa da 7V a 15V. La *vrect* è la tensione misurata ai capi del condensatore di *storage*, il quale si carica fino ad arrivare a regime.

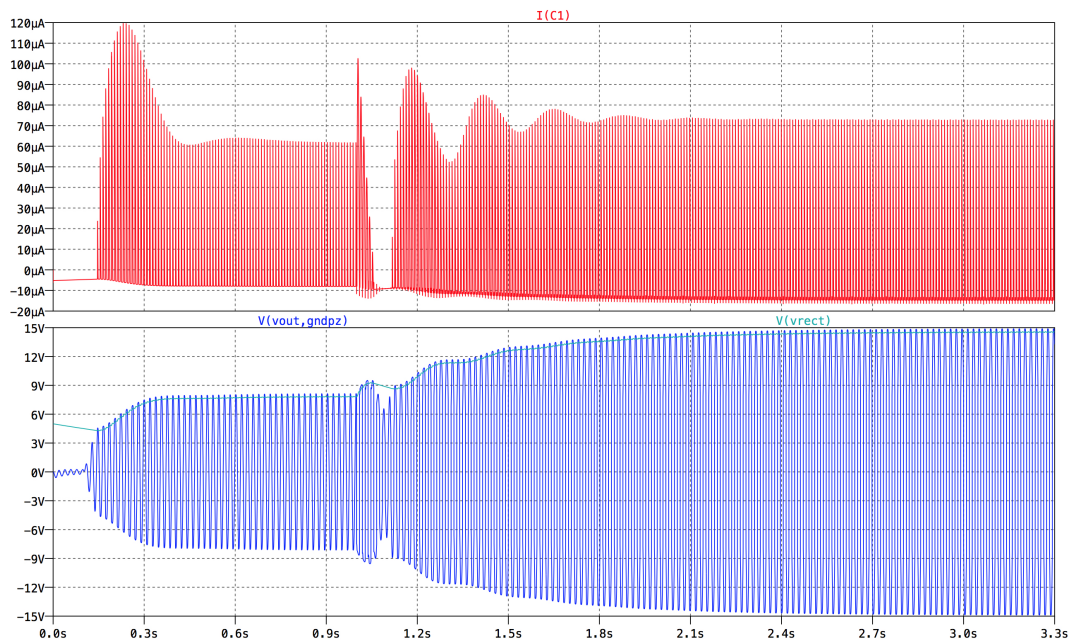


Figura 4.5: Forme d'onda ottenute con tecnica SSHI-parallel.

La Figura 4.6 che segue mostra nel dettaglio la  $vout$  e gli effetti del ritardo positivo e negativo sulla forma d'onda.

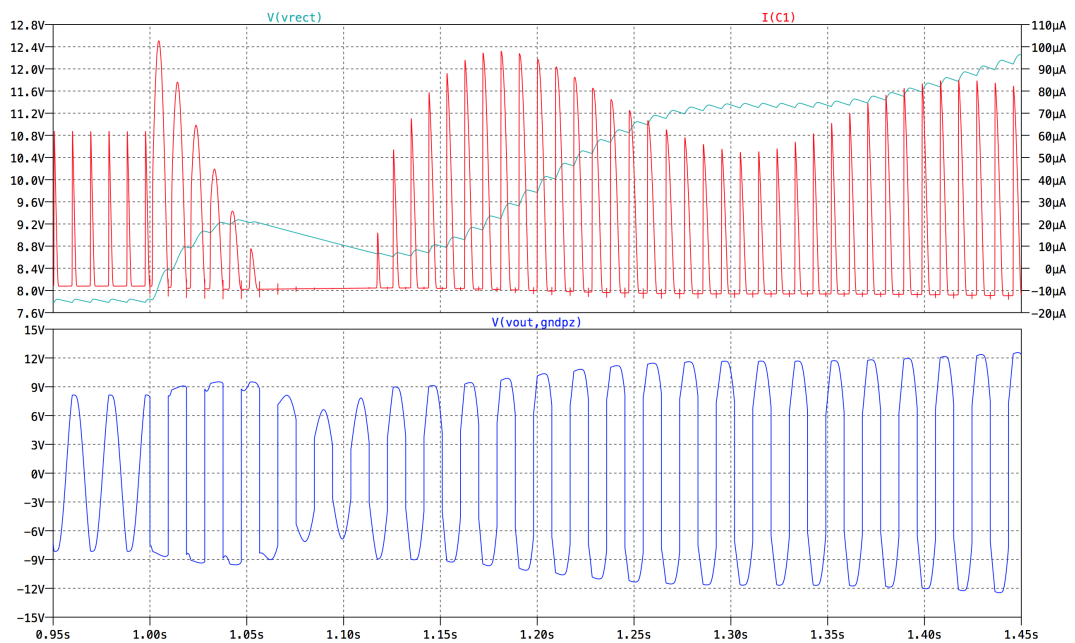


Figura 4.6: Zoom delle forme d'onda ed effetto dei ritardi su di esse.

## 4.3 Energia Estratta

In questa sezione verrà descritto l'algoritmo utilizzato per il calcolo dell'energia estratta con questo tipo di conversione e verranno infine confrontati i risultati con quelli ottenuti per il caso SECE del capitolo precedente.

### 4.3.1 L'algoritmo Matlab

Una volta terminata la simulazione, si è passati al calcolo dell'energia estratta: in questo caso, non è possibile utilizzare la formula dell'energia  $E = \frac{1}{2}C_p \sum_{i=1}^n V_i^2$ , usata per i casi SECE e Q-SECE. Dal momento che, il processo di estrazione dell'energia avviene quando la *vout* è a regime, ovvero negli istanti c-d della Figura 4.3(b), occorrerà calcolare l'energia mediante l'integrale della potenza nel tempo, come espresso nella formula:

$$E = \int_{t_0}^{t_f} P dt \quad (4.1)$$

La potenza in questo caso è quella richiesta dal carico in uscita e, per valutare tale potenza, è stato inserito un generatore di tensione in continua al posto del condensatore di *storage*. In base ai dati ricavati nel capitolo 2 dalla caratteristica P-V del SSHI, è stato scelto il valore ottimo che fornisce la massima potenza media d'uscita, rispetto agli altri valori misurati. In questo caso tale valore si aggira intorno ai 7V.

Dopo aver sostituito il condensatore con questo generatore, è stata ripetuta la simulazione sotto le stesse condizioni iniziali e si è passati in ambiente di sviluppo Matlab per il calcolo dell'integrale.

Viene ora inserito il frammento di codice 4.2 relativo all'algoritmo creato per calcolare l'energia estratta in uscita, misurata sul generatore in uscita e non ai capi dell'uscita del piezo come per la conversione SECE: dopo aver estratto i valori di tensione e corrente del generatore in uscita dal file *.raw*, è stata utilizzata la funzione *LTspice2Matlab* per utilizzare i valori di *vrect* e *I(V3)* in funzione del vettore dei tempi.

```

1 %% Analisi dell' energia dell 'SSHI attraverso i dati elaborati da LTspice
  %%
2 clc ;
3 clear ;
4
5 dati = LTspice2Matlab('\Users\Alice\Desktop\Progetto\
  simulazioni\LTspice\SSHI_rectifier_v2.raw');
6

```

```

7 % salvo il vettore dei tempi
8 time = dati.time_vect;
9
10 % salvo gli impulsi di conversione
11 v_conv = dati.variable_mat(3,:);
12
13 % salvo la corrente nel generatore
14 i_v3 = dati.variable_mat(27,:);
15
16 % salvo la tensione del generatore
17 v_rect = dati.variable_mat(10,:);
18
19 % fino a quando non inizio la conversione non calcolo l'energia
20 index = 1;
21 while v_conv(index) == 0
22     index = index+1;
23 end
24
25 % creo il vettore potenza
26 P = zeros(1,dati.num_data_pnts);
27
28 for i = index:dati.num_data_pnts
29     P(i) = v_rect(i)*i_v3(i);
30 end
31
32 % calcolo l'integrale della potenza nel tempo per ottenere l'energia di
    conversione
33 E = trapz(time,P);

```

Listing 4.2: “sshi\_generator\_energy\_extraction.m”: algoritmo per il calcolo dell'integrale della potenza nel tempo

Per il calcolo dell'integrale, è stata utilizzata la funzione *trapz* (Trapezoidal numerical integration), che prende in ingresso il vettore dei tempi e la potenza associata al tempo *i*-esimo. In questo caso la potenza è quella assorbita dal generatore V3 posto in uscita con la formula  $V(v_{rect}) \times I(V3)$ .

### 4.3.2 Stima dell'energia

Viene ora inserita la Tabella 4.1 contenente i dati relativi all'energia estratta con la tecnica SSHI-parallel, facendo variare la tensione in uscita al generatore in un intervallo compreso tra 1V e 15V.

V3 [V]	Energy [mJ]
1	0.4359
2	0.7976
3	1.0871
4	1.3073
5	1.4606
6	1.5495
7	1.7608
8	1.5440
9	1.4549
10	1.3097
11	1.1110
12	0.8600
13	0.5578
14	0.2058

Tabella 4.1: Valori dell'energia estratta dalle simulazioni in funzione della tensione fornita al generatore V3 per SSHI-parallel.

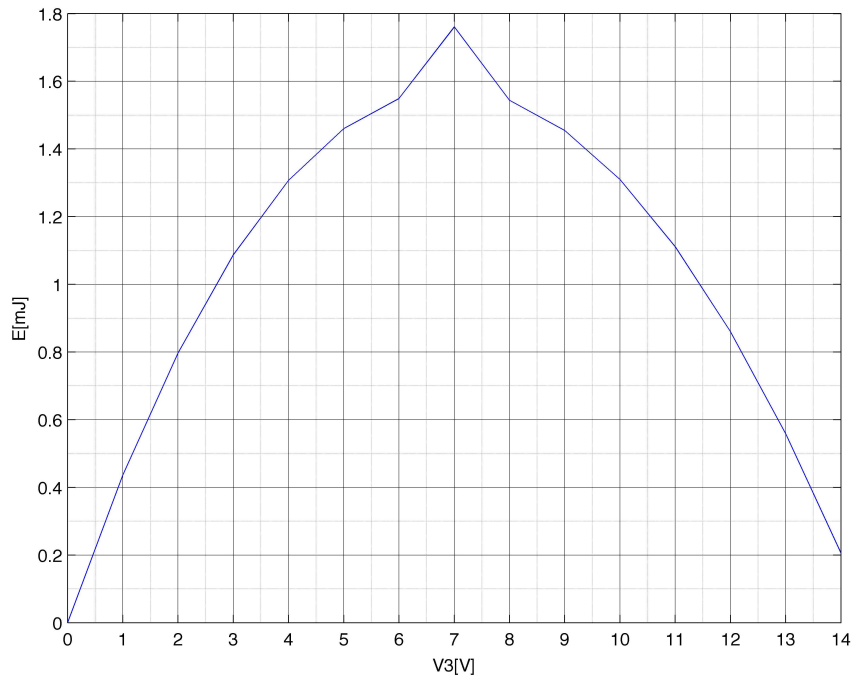


Figura 4.7: Andamento dell'energia estratta con SSHI-parallel all'uscita del convertitore.

Il precedente grafico è stato ottenuto dal *plot* dei valori della tabella: si può vedere che in corrispondenza dei 7V vi è il picco massimo di Energia estratta. Dai risultati ottenuti dalle simulazioni, si nota che il valore ottimo dell'energia estratta si ha quando il generatore V3 ha un valore in continua di 7V.

Non è possibile fare un confronto diretto, partendo dall'energia ottenuta con l'estrazione SSHI-parallel, con l'energia estratta con SECE e Q-SECE, poiché  $E_{sshi}$  è l'energia ottenuta all'uscita del convertitore e quindi tiene conto della sua efficienza, mentre  $E_{sece}$  è l'energia estratta dal trasduttore piezoelettrico e non all'uscita del convertitore, pertanto i due valori non sono confrontabili.

# Conclusioni

Arrivati alla fine di questa tesi, si possono fare le seguenti riflessioni: l'obiettivo da cui si è partiti, era di cercare una tecnica di estrazione dell'energia il più efficiente possibile, in grado di fornire ad un qualsiasi utilizzatore la potenza necessaria per alimentarsi. Sebbene i tre metodi analizzati abbiano portato a buoni risultati, non è stato possibile confrontare tra loro la conversione SECE e SSHI per la loro diversa natura, ma è stato possibile fare una stima dell'energia estratta grazie ad esse, ricordando che i risultati ottenuti, per quanto si è cercato un modello affidabile che si avvicinasse al caso reale, sono frutto di simulazioni e algoritmi fatti al calcolatore.

Per quanto riguarda il confronto fatto tra SECE e Q-SECE nel capitolo 3, utilizzando il circuito implementato con il rettificatore e con il circuito di conversione costituito dai due *switches*, si può dire che il risultato ottenuto si riallinea con quelli sperimentali precedentemente calcolati. Il fatto di utilizzare degli impulsi randomizzati nel tempo e saltare qualche conversione fa sì che il piezoelettrico risenta meno dell'effetto damping, che attenua la tensione d'uscita e questo si traduce in un incremento delle prestazioni del 30% rispetto all'estrazione sincrona. Tuttavia non tutte le configurazioni sono ottime, anzi per alcune di esse le prestazioni energetiche si degradano tanto che il rendimento scende sotto l'unità. Osservando il grafico di Figura 3.10, si osserva che il massimo rendimento si ha quando il periodo entro cui far cadere gli impulsi è compreso tra  $[-\frac{T}{4}, \frac{T}{4}]$  e la probabilità che la conversione avvenga sia pari al 100%, ovvero vengono presi tutti gli impulsi.

Tuttavia, è bene ricordare che si sta parlando di energia estratta all'uscita del circuito equivalente e non dal convertitore: anche se con questa tecnica estraiamo energia nell'ordine dei  $mJ$ , il SECE e Q-SECE non permettono di fare stime sull'energia a valle del convertitore, non conoscendo la sua efficienza.

Un'analisi analoga è stata eseguita anche per SSHI-parallel: le forme d'onda ottenute implementando questo modello rispecchiano l'andamento previsto in [4]: in particolare l'idea di invertire la tensione ad ogni conversione e il ritardo introdotto dallo *switching* hanno portato a calcolare un'energia in

uscita di circa  $1.7 \text{ mJ}$ . Sebbene, ad occhio questo risultato ci risulti superiore a quello ottenuto nel caso SECE, non si può fare un diretto confronto tra i due, perchè l'energia calcolata dalle simulazioni con SSHI è proprio l'energia in uscita dal convertitore. Questo buon risultato, poteva essere previsto osservando la curva della caratteristica statica studiata nel capitolo 2. La parabola del SSHI approssima a meno di un errore l'andamento della potenza che si avrebbe in uscita se al modello elettromeccanico attaccassimo solo il rettificatore.

Per motivi di tempo non è stato possibile cercare un metodo per stimare l'energia in uscita dal convertitore SECE e confrontare il risultato con quello di SSHI, cosa che sarebbe stata davvero interessante ai fini di questa indagine, per capire quale delle tecniche sia la migliore.



# Elenco delle figure

1.1	Rappresentazione del trasduttore piezoelettrico [2]. . . . .	3
1.2	Circuito equivalente elettromeccanico del trasduttore piezoelettrico [2]. . . . .	4
1.3	Circuito equivalente nelle due configurazioni di circuito aperto e corto circuito. . . . .	5
1.4	Processo di immagazzinamento della carica [2] . . . . .	6
1.5	Progresso di estrazione dell'energia [2] . . . . .	7
1.6	Andamento del rapporto di tensione $k = \frac{V_p^*}{V_{p0}}$ in circuito aperto per ogni frequenza. Si nota un'attenuazione in corrispondenza della frequenza di risonanza, calcolata in questi grafici per masse inerziali differenti. Quest'immagine è stata presa da [1] nella V sezione, relativa ai risultati sperimentali. . . . .	8
1.7	Valori dei parametri del modello elettromeccanico misurati sperimentalmente con tre masse inerziali di 7g, 11g, 16g [1]. . . . .	9
1.8	Confronto del rendimento di potenza nel caso SECE e Q-SECE. In questo grafico è rappresentata l'energia estratta da un trasduttore Q220-A4-303YB PT con massa inerziale 7g. Immagine tratta dallo studio e dai risultati sperimentali in [2]	10
2.1	Modello elettromeccanico con rettificatore. . . . .	12
2.2	Andamento della potenza fornita in uscita nel caso rettificatore.	14
2.3	Circuito con estrazione SECE e rettificatore. . . . .	15
2.4	Andamento della potenza con implementazione SECE. . . . .	16
2.5	Circuito con estrazione SSHI-parallel e rettificatore. . . . .	17
2.6	Andamento della potenza con implementazione SSHI. . . . .	18
2.7	Confronto dei grafici ottenuti dalle misure effettuate. . . . .	19
3.1	Modello elettromeccanico equivalente con rettificatore e conversione comandata tramite due switches ideali. . . . .	22

3.2	Schema logico dell'interazione tra Matlab e LTspice per la generazione di impulsi sincroni/random e calcolo dell'energia. . . . .	25
3.3	Impulsi sincroni positivi e negativi generati da Matlab e rispettiva FFT. . . . .	30
3.4	Impulsi random generati da Matlab e rispettiva FFT. . . . .	31
3.5	Sovrapposizione dei grafici precedenti. . . . .	31
3.6	Conversione SECE con $\frac{m}{n} = 50\%$ e impulsi compresi tra $[-\frac{T}{4}, \frac{T}{4}]$ . La forma d'onda in blu rappresenta la <i>vout</i> mentre in rosso sono raffigurati gli impulsi sincroni. . . . .	37
3.7	Zoom della tensione in uscita sul piezo: la durata dell'impulso fissa a $70\mu s$ permette al piezo di scaricarsi completamente. Contemporaneamente la corrente sull'induttore $L_1$ cresce durante tutto il processo di scarica di $C_p$ e raggiunge il suo massimo quando <i>vout</i> arriva a zero. . . . .	38
3.8	Conversione Q-SECE con $\frac{m}{n} = 50\%$ e impulsi compresi tra $[-\frac{T}{4}, \frac{T}{4}]$ . . . . .	38
3.9	Zoom della forma d'onda di tensione in uscita dal piezo con conversione Q-SECE. . . . .	39
3.10	Andamento del rendimento energetico in funzione della probabilità di conversione e del periodo entro cui cadono gli impulsi. . . . .	41
3.11	Tensione <i>vout</i> del SECE usato in [3] con conversione sincrona e attenuazione a 0.2V dovuta al damping . . . . .	42
3.12	Tensione <i>vout</i> del SECE con rettificatore con conversione sincrona e attenuazione a 0.4V dovuta al damping . . . . .	42
4.1	Configurazione SSHI con switch e induttore in parallelo [4] . . . . .	46
4.2	Configurazione SSHI con switch e induttore in serie[4]. . . . .	47
4.3	Forme d'onda SSHI-parallel con ritardo negativo (a) e ritardo positivo (b) [4]. . . . .	48
4.4	Modello elettromeccanico con rettificatore e tecnica SSHI-parallel . . . . .	49
4.5	Forme d'onda ottenute con tecnica SSHI-parallel. . . . .	52
4.6	Zoom delle forme d'onda ed effetto dei ritardi su di esse. . . . .	52
4.7	Andamento dell'energia estratta con SSHI-parallel all'uscita del convertitore. . . . .	55

# Elenco delle tabelle

2.1	Valori Tensione-Potenza nel caso di rettificatore. . . . .	13
2.2	Valori Tensione-Potenza nel caso SECE con rettificatore. . . .	16
2.3	Valori Tensione-Potenza nel caso SSHI-parallel con rettificatore.	18
3.1	Risultati delle simulazioni con periodo e probabilità variabile.	40
4.1	Valori dell'energia estratta dalle simulazioni in funzione della tensione fornita al generatore V3 per SSHI-parallel. . . . .	55



# Listings

3.1	Netlist LTspice del modello elettromeccanico per le conversioni SECE e Q-SECE . . . . .	23
3.2	“pulse_generator.m”: codice per la randomizzazione degli impulsi. . . . .	26
3.3	“writepwl_qsece.m”: codice per la generazione degli impulsi. . . . .	32
3.4	“energy_extraction.m”: codice per il calcolo dell’energia in Joule. . . . .	35
4.1	Netlist LTspice del modello elettromeccanico per le conversioni SSHI.parallel . . . . .	49
4.2	“sshi_generator_ energy_ extraction.m”: algoritmo per il calcolo dell’integrale della potenza nel tempo . . . . .	53



# Ringraziamenti

Desidero ringraziare il Professor Romani, relatore di questa tesi, per la sua disponibilità, pazienza e aiuto che mi ha dato durante la realizzazione di questo progetto, permettendomi di imparare ad utilizzare strumenti e software mai usati prima e di mettere in pratica tutto ciò che ho studiato in questo percorso di studi. Un grazie anche ai suoi collaboratori e al Dott. Matteo Filippi che mi ha seguito e aiutato soprattutto nella parte delle simulazioni.

Arrivata alla fine di questo percorso universitario, sento di dover ringraziare con tutto il cuore le persone che mi hanno aiutato a raggiungere questo traguardo. La prima persona che devo ringraziare è il mio fidanzato Alessandro, a cui ho dedicato questa tesi, per il sostegno morale e psicologico, per l'infinita pazienza che ha nel placare le mie preoccupazioni e le mie ansie, e per prendersi cura di me ogni giorno con amore. Condividere con lui il percorso di vita e quello universitario, mi ha permesso di crescere non solo come persona ma anche intellettualmente: è davvero una fortuna e un piacere avere accanto una persona come lui, con cui condividere gli studi e gli stessi interessi per il mondo scientifico matematico. È grazie a lui se sono riuscita a vivere a pieno questi anni, perchè mi ha mostrato il lato positivo di tutto ciò che io vivevo con ansia e paura. Un sincero ringraziamento va anche alle persone che hanno permesso che tutto questo si realizzasse: i miei genitori. Consapevole dei sacrifici che fanno ogni giorno per permettermi di studiare lontano da casa, spero di ripagarli e di renderli felici con questo piccolo traguardo raggiunto. Li ringrazio soprattutto per aver sempre creduto in me. Un grazie a tutta la mia famiglia e a mia sorella Alessia, per avermi sempre sostenuto e dato conforto in ogni circostanza.





# Bibliografia

- [1] A. Romani, R. P. Paganelli, E. Sangiorgi and M. Tartagni, “Joint Modeling of Piezoelectric Transducers and Power Conversion Circuits for Energy Harvesting Applications”, *IEEE SENSORS JOURNAL*, vol. 13, no. 3, pp. 916-924, Mar 2013.
- [2] A. Romani, M. Filippi, “Quasi-synchronous Charge Extraction for Improved Energy Harvesting from Highly Coupled Piezoelectric Transducers”, *Procedia Engineering*, vol. 87, 2014, pp.1525-1528.
- [3] D. Dosio, “Energy harvesting da trasduttori piezoelettrici mediante estrazione di carica quasi-sincrona”, tesi di laurea, Università di Bologna, Corso di Laurea in ingegneria elettronica, informatica e telecomunicazioni, a.a 2012-2013, rel. A. Romani.
- [4] M. Lallart, Y.C. Wu, D.Guyomar, “Switching Delay Effects on Non-linear Piezoelectric Energy Harvesting Techniques”, *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, vol. 59, no. 1, pp. 464-472, Jan 2012.
- [5] MathWorks, MatWorks Documentation, <http://it.mathworks.com/help/>
- [6] Linear Technology, Linear Technology Solutions, <http://www.linear.com/solutions/>